

ИЗМЕРЕНИЕ. МОНИТОРИНГ. УПРАВЛЕНИЕ. КОНТРОЛЬ

Научно-производственный журнал

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Юхно А. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ
СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

5

**Панарин М. В., Рыбка Н. А., Маслова А. А.,
Сергеечев В. В., Загуменнов И. Ю.**

ОСНАЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ АВТОМАТИЧЕСКИМИ
СРЕДСТВАМИ КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ
ВЫБРОСОВ ОБЪЕКТОВ 1-й КАТЕГОРИИ

12

**Бростилова Т. Ю., Горячев В. Я., Нефедьев Д. И.,
Тихомирова А. А., Абдирашев О. К.**

МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

21

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Бобылев Д. А., Боровских А. П.

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ, ТОЧНОСТЬ
И БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО
И ЧАСТОТНОГО МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ
ИДЕНТИФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ
СО СХЕМАМИ ЗАМЕЩЕНИЯ В ВИДЕ
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

34

Волчихин В. И., Иванов А. И., Карпов А. П., Юнин А. П.
ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ
ЭНТРОПИИ ДЛИННЫХ ОСМЫСЛЕННЫХ ПАРОЛЕЙ
В ПРОСТРАНСТВЕ СВЕРТОК ХЭММИНГА

43

Королев П. Г.
ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ
С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ САМОКОНТРОЛЕМ

51

ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Алимурадов А. К., Тычков А. Ю., Чураков П. П., Султанов Б. В.
СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТНОЙ РАЗБОРЧИВОСТИ
РЕЧИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

58

Бодин О. Н., Солодимова Г. А., Спиркин А. Н.
НЕЙРОИНТЕРФЕЙС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
РОБОТИЗИРОВАННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

70

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Макаров И. В., Перельгина А. В., Чапанов Н. С., Шокоров В. А.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА СВОЙСТВА МОНОСУЛЬФИДА САМАРИЯ В ПРОЦЕССЕ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

77

MEASURING. MONITORING. MANAGEMENT. CONTROL

Scientific-production journal

CONTENT

INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEMS

Yuhno A. I.

STUDY OF ALGORITHM FOR JOB INFORMATION-MEASURING
AND CONTROL SYSTEM THE QUALITY CONTROL
OF DRINKING WATER

5

Panarin M. V., Rybka N. A., Maslova A. A.,

Sergeechev V. V., Zagumennov I. Yu.

EQUIPMENT OF STATIONARY SOURCES OF HARMFUL
(POLLUTANT) SUBSTANCES BY AUTOMATIC MEANS
OF CONTROL OF INDUSTRIAL EMISSIONS
OF OBJECTS OF THE 1ST CATEGORY

12

Brostilova T. Yu., Goryachev V. Ya., Nefed'ev D. I.,

Tikhomirova A. A., Abdirashev O. K.

METHOD OF ANALYSIS OF SYSTEMATIC ERROR
OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM
OF DISPLACEMENTS BASED ON LINEAR
DISPLACEMENT SENSOR FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS

21

DEVICES AND METHODS OF MEASURING

Bobylev D. A., Borovskikh L. P.

NOISE IMMUNITY, ACCURACY AND SPEED OF PARAMETRIC
IDENTIFICATION OF OBJECTS WITH EQUIVALENT CIRCUITS
IN THE FORM OF A MULTIELEMENT TWO-PORT
BY MEANS OF PULSE AND FREQUENCY METHODS

34

Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Karpov A. P., Yunin A. P.
POSSIBILITIES OF REGULARIZING THE ENTROPY
CALCULATIONS OF LONG MEANINGFUL PASSWORDS
IN HAMMING CONVOLUTIONS SPACE

43

Korolev P. G.
MEASURING INSTRUMENTS WORK ORGANIZATION
WITH METROLOGICAL SELF-CONTROL

51

MEDICAL DEVICES, SYSTEMS AND PRODUCTS

Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Churakov P. P., Sultanov B. V.
METHOD TO DETERMINE FORMANT SPEECH INTELLIGIBILITY
FOR ESTIMATING PSYCHO-EMOTIONAL STATE OF CONTROL
SYSTEM OPERATORS WITH A HIGH DEGREE OF RESPONSIBILITY

58

Bodin O. N., Solodimova G. A., Spirkin A. N.
NEUROINTERFACE FOR CONTROLLING ROBOTIC DEVICES

70

TECHNOLOGY INSTRUMENTATION

Makarov I. V., PereLygina A. V., Chapanov N. S., Shokorov V. A.
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL
TREATMENT ON THE PROPERTIES OF SAMARIUM
MONOSULFIDE IN THE PROCESS OF MANUFACTURING
PRESSURE SENSOR CRYSTALS

77

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 504.064.3

DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-1

А. И. Юхно

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА РАБОТЫ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ И УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ¹

A. I. Yuhno

STUDY OF ALGORITHM FOR JOB INFORMATION-MEASURING AND CONTROL SYSTEM THE QUALITY CONTROL OF DRINKING WATER

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Качество питьевой воды зависит от множества параметров, которые динамически изменяются, в то время как система обеззараживания, применяемая на типовых станциях водоподготовки, не способна своевременно адаптироваться под эти изменения. Это зачастую является причиной перехлорирования и негативно сказывается на здоровье населения. В связи с этим основной целью данного исследования является контроль дозирования хлорагента и содержания побочных продуктов обеззараживания в «онлайн» режиме. **Материалы и методы.** В ходе исследования проведена оценка и моделирование параметров контроля качества питьевой воды на станциях водоподготовки с использованием интеллектуальных методов анализа, а именно: нейросетевого моделирования и методов нечеткой логики. **Результаты.** Разработан алгоритм, реализующий работу информационно-измерительной системы контроля дозирования хлорагента и содержания побочных продуктов обеззараживания в «онлайн» режиме. Создание алгоритма осуществлялось в среде имитационного моделирования Simulink. Проведен анализ эффективности алгоритма работы информационно-измерительной системы контроля качества питьевой воды. **Выводы.** Алгоритм работы интеллектуальной информационно-измерительной системы контроля дозирования хлорагента позволяет обрабатывать несколько входных параметров контроля качества воды и регулировать дозировку хлора с позиции оценки канцерогенного риска образования хлорорганических соединений.

A b s t r a c t. Background. The quality of drinking water depends on many parameters that change dynamically, while the disinfection system used at typical water treatment plants is not able to adapt to these changes in a timely manner. This is often the cause and has a negative impact on the health of the population. In this regard, the main purpose of this study is to control the dosage of chloragent and the content of disinfection byproducts in the «online» mode. **Materials and methods.** In the course of the study, the parameters of drinking water quality

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00489.

control at water treatment plants were evaluated and simulated using intelligent analysis methods, namely neural network modeling and fuzzy logic methods. **Results.** An algorithm has been developed that implements the operation of the information-measuring system for monitoring the dosing of chloragent and the content of disinfection byproducts in the «online» mode. The creation of the algorithm was carried out in the simulation environment Simulink. The approbation of the algorithm, which allows to reflect the efficiency of the information and measurement system of drinking water quality control, was carried out. **Conclusions.** The algorithm, which implements the work of the intelligent information and measurement system of chloragent dosing control, allows to process several input parameters of water quality control and adjust the chlorine dosage from the position of assessing the carcinogenic risk of organochlorine compounds formation.

К л ю ч е в ы е с л о в а: алгоритм, контроль качества, информационно-измерительная система, питьевая вода, нейросетевые технологии, нечеткая логика.

Key words: algorithm, quality control, information and measurement system, drinking water, neural network technologies, fuzzy logic.

Введение

В последнее время все больше внимание исследователей привлекает вопрос негативного влияния качества питьевой воды на здоровье населения. В работах [1–3] доказывается, что образование хлорорганических соединений (ХОС) в водопроводной воде как побочный негативный эффект дезинфекции способно при хроническом употреблении вызывать у населения злокачественные новообразования (ЗН). Анализ статистических данных на примере г. Таганрога позволил определить, что многолетняя динамика общей заболеваемости ЗН за последние пятнадцать лет при выраженной вариабельности годовых показателей характеризуется тенденцией к росту (рис. 1) [4]. Данная статистика объясняет актуальность контроля дозирования хлорагента и, как следствие, содержание ХОС в технологии подготовки питьевой воды.

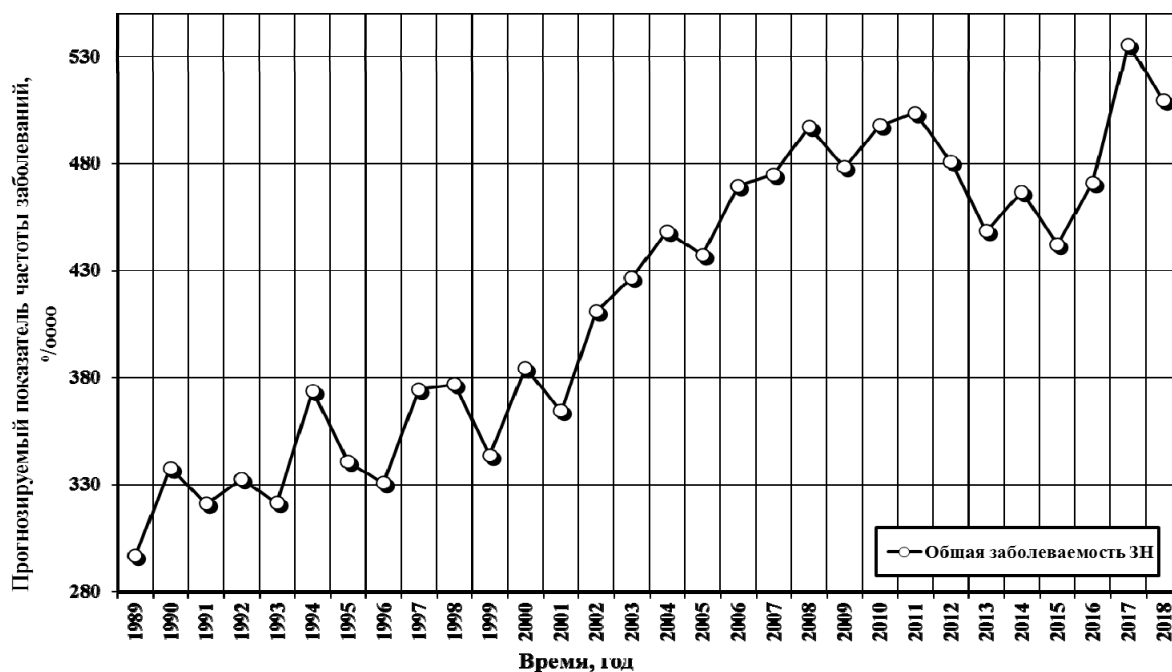


Рис. 1. Динамика общей первичной заболеваемости злокачественными новообразованиями населения г. Таганрога за период 1989–2018 гг.

Кроме того, в ходе исследования проведен эксперимент по лабораторному хлорированию воды и по полученным в результате эксперимента концентрациям ХОС был проведен расчет суммарного канцерогенного риска согласно Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке

риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду». Суммарный канцерогенный риск рассчитывался из риска для всех проанализированных веществ и всех путей их поступления в организм (пероральный, ингаляционный, накожный). На рис. 2 отражено изменение суммарного канцерогенного риска в зависимости от роста концентрации остаточного хлора.

Проведенный анализ позволил выявить, что наибольший вклад в значение суммарного канцерогенного риска вносит пероральный риск [4]. Его значения в среднем в 10 раз выше, относительно других путей поступления в организм.

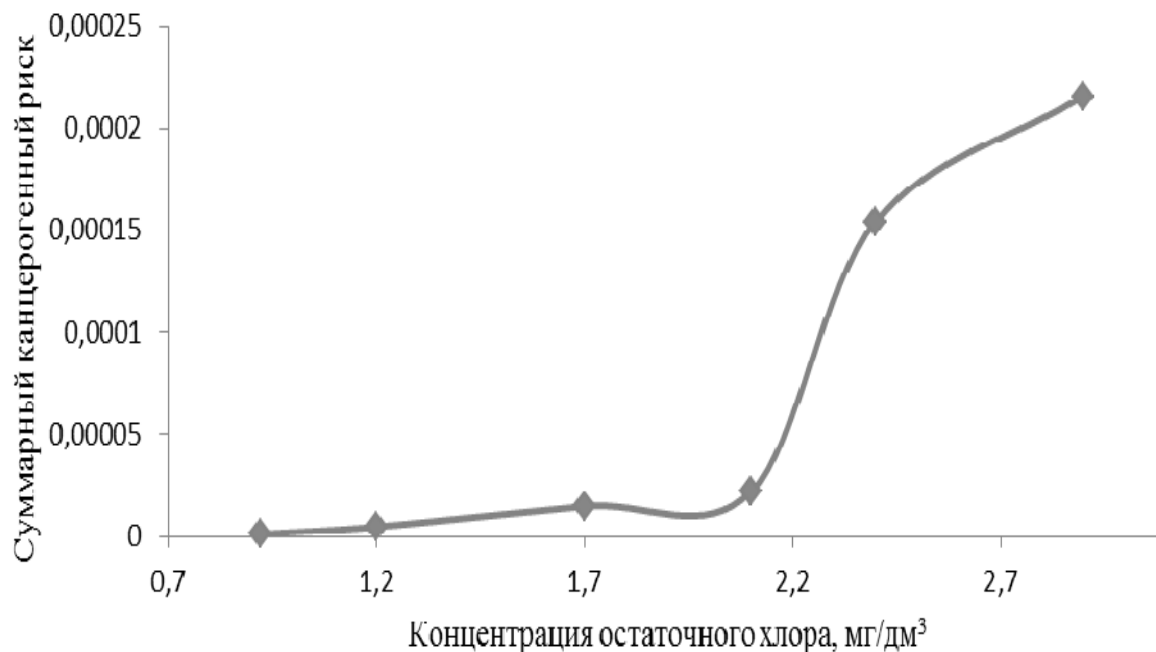


Рис. 2. Изменение суммарного канцерогенного риска в зависимости от роста концентрации остаточного хлора

На графике рис. 2 заметен скачок при изменении концентрации остаточного хлора от 2,1 до 2,4 мг/дм³, т.е. сравнительно небольшое изменение такого показателя, как остаточный хлор, способно на порядок увеличить уровень суммарного канцерогенного риска образования хлорорганических соединений в питьевой воде.

Расчет суммарного канцерогенного риска для побочных продуктов хлорирования позволил отразить, что уже при оптимальной дозе хлорагента (доза, при которой остаточный хлор находится в диапазоне 0,8–1,2 мг/дм³) значения суммарного риска принадлежат верхней границе приемлемого риска. Данная закономерность показывает, что нормирование достаточности и безопасности вносимой при обеззараживании дозы хлорагента по одному регулируемому параметру – остаточный хлор – не является достаточным. На понятие достаточности дозы хлора влияет ряд параметров, в том числе значение канцерогенного риска. В связи с этим является актуальной разработка системы контроля дозирования хлорагента, в которой дозировка регулируется в зависимости от качества воды и канцерогенного риска образования ХОС в режиме реального времени [5–7]. Описание нейросетевой модели и параметров системы приведено в работах [8–9].

Разработка алгоритма

Разработанная интеллектуальная информационно-измерительная система (ИИУС) контроля дозирования хлорагента, содержания хлорорганических соединений и поддержания достаточного уровня остаточного хлора в питьевой воде на станциях водоподготовки в режиме реального времени была реализована в виде алгоритма с использованием графической среды имитационного моделирования Simulink. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

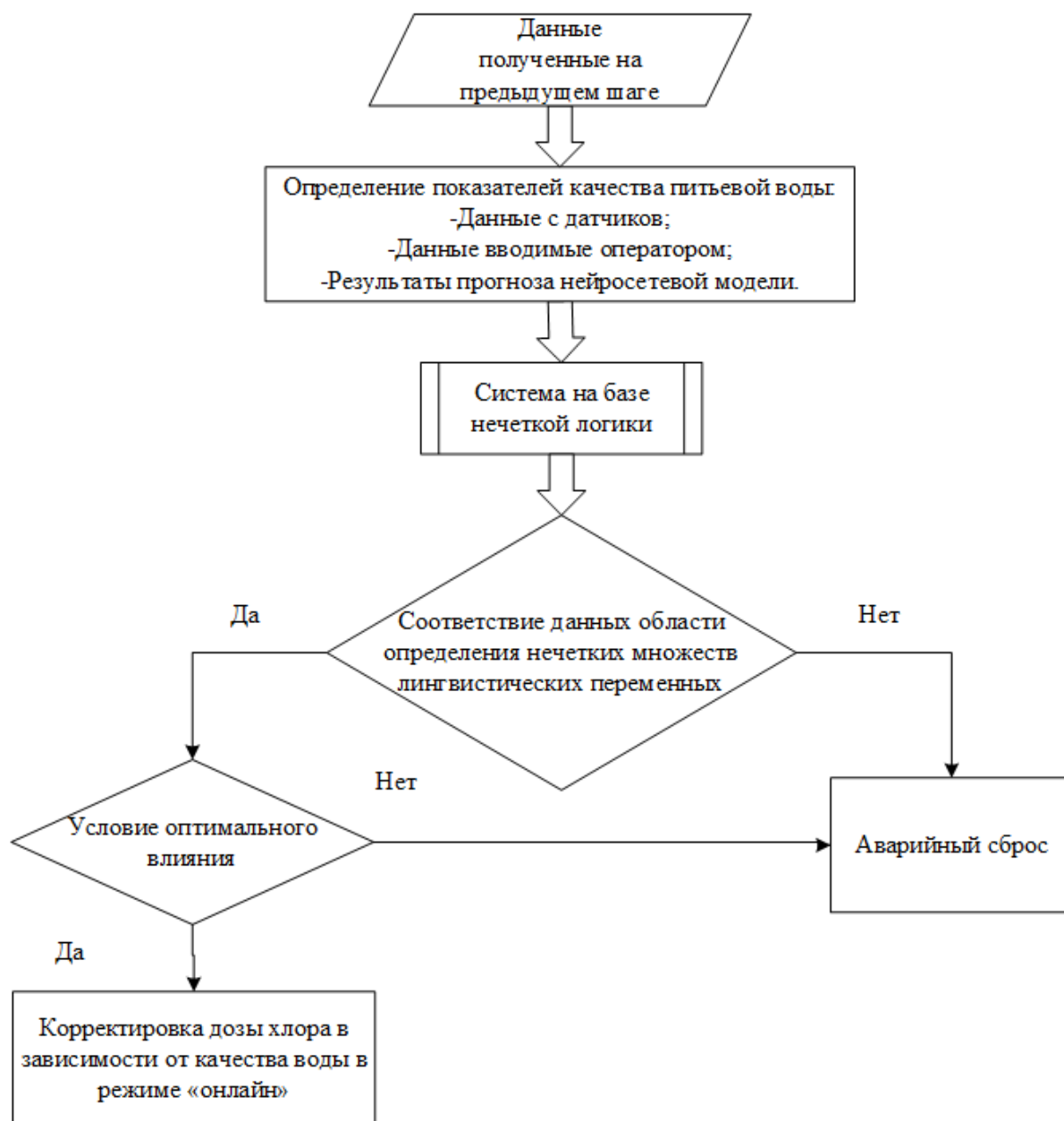


Рис. 3. Блок-схема алгоритма, реализующего работу ИИУС

Алгоритм, реализующий работу интеллектуальной информационно-измерительной системы контроля на базе аппарата нечеткого вывода для регулирования дозирования хлора, позволяет уйти от этапа вторичного хлорирования в процессе водоподготовки, поэтому делает его предпочтительней, по сравнению с типовыми системами регулирования.

В процессе исследования был проведен анализ качества работы алгоритма, реализующего работу интеллектуальной информационно-измерительной и управляющей системы контроля дозирования хлорагента и содержания хлороформа в питьевой воде на станциях водоподготовки. В ходе анализа эффективности работы алгоритма задавались одни и те же входные параметры системы, а именно: концентрация остаточного хлора, водородный показатель, перманганатная окисляемость, температура и хлорпоглощаемость. Прогнозируемая системой концентрация хлороформа, а также другие входные параметры нечеткого вывода позволили определить коэффициент дозы хлора, рассчитанный алгоритмом. На рис. 4 представлено сравнение рассчитанного алгоритмом коэффициента с коэффициентом, рассчитанным по реальной добавке, применяемым в типовых процессах водоподготовки при аналогичных условиях качества природной воды и параметрах водоподготовки.

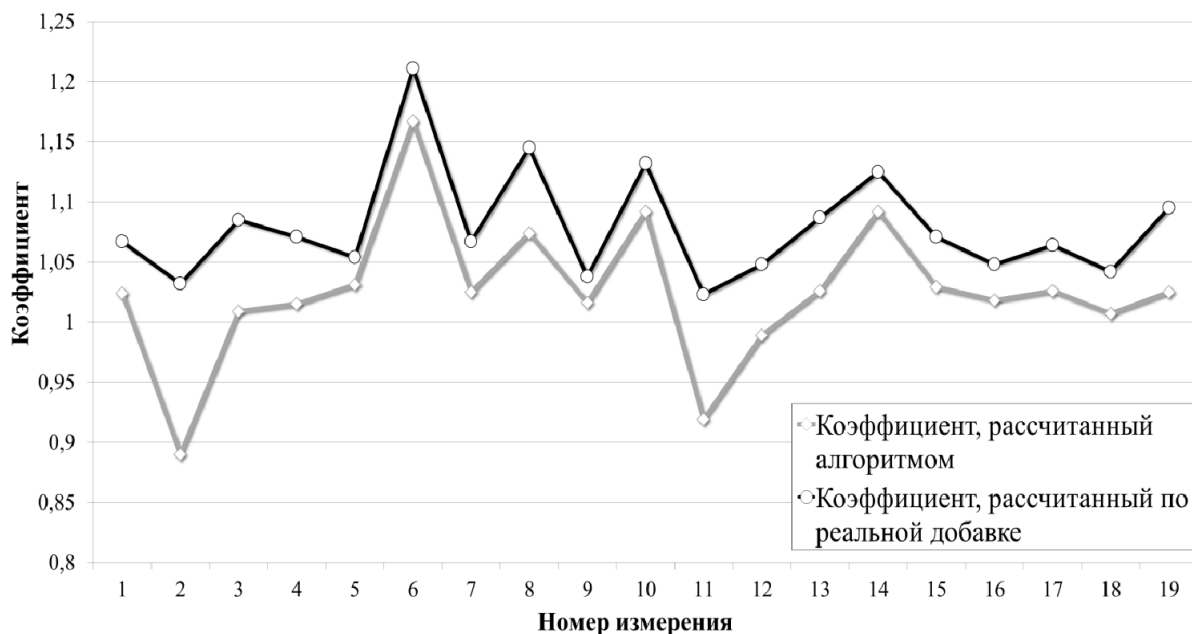


Рис. 4. Сравнение коэффициента, рассчитанного алгоритмом, с коэффициентом, рассчитанным по реальной добавке

Кроме того, анализ качества работы алгоритма, реализующего интеллектуальную ИИУС, выявил значительное снижение в разбросе значений остаточного хлора. На рис. 5 показана динамика концентрации остаточного хлора, полученная экспериментально на одной из станций водоподготовки, и динамика остаточного хлора, моделируемого разработанной системой контроля дозирования хлорагента, содержания ХОС и остаточного хлора в режиме реального времени.

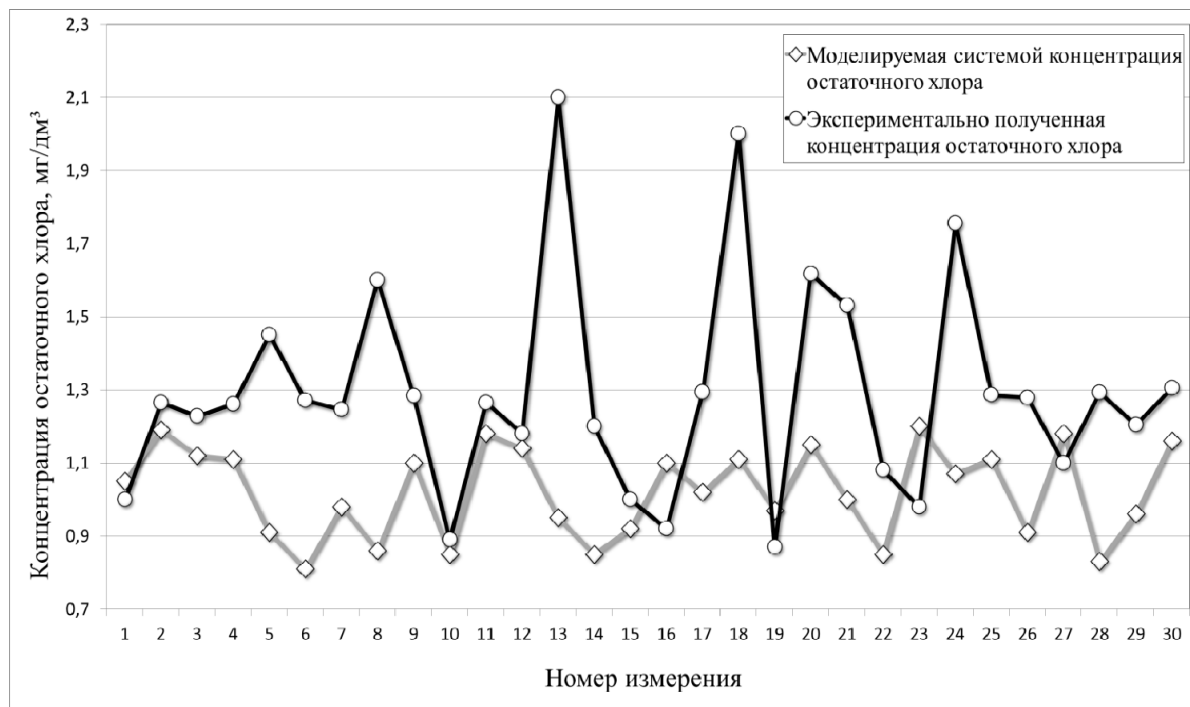


Рис. 5. Динамика концентрации остаточного хлора, полученная экспериментально и моделируемая по алгоритму

Анализ полученных данных позволил оценить дисперсию остаточного хлора, которая характеризует меру разброса данной величины.

Обсуждение результатов

Таким образом, разработанная интеллектуальная ИИУС контроля дозирования хлорагента на базе нечеткой логики позволит стабилизировать подачу хлора, увеличить эффективность технологического процесса, качество управления дозированием хлорагента на станциях водоподготовки, а также позволит избежать перехлорирования питьевой воды и обеспечить более безопасное водопотребление благодаря непрерывному контролю канцерогенного риска здоровью населения.

Сравнение рассчитанного алгоритмом коэффициента с коэффициентом, рассчитанным по реальной добавке, применяемым в типовых процессах водоподготовки при аналогичных условиях качества природной воды и параметрах водоподготовки, показало, что коэффициент, рассчитанный алгоритмом, позволит снизить избыточное хлорирование приблизительно на 15 %.

Было выявлено, что экспериментально полученная концентрация остаточного хлора обладает значением дисперсии не менее 0,11, в то время как концентрация остаточного хлора, полученная в результате моделирования, составляет около 0,015. Данный результат говорит о снижении колеблемости концентрации остаточного хлора на порядок, а значит, и о повышении уровня надежности и эффективности системы при использовании разработанной ИИУС.

Алгоритм работы интеллектуальной ИИУС контроля дозирования хлорагента, позволяет обрабатывать несколько входных параметров контроля качества воды и регулировать дозировку хлора с позиции оценки канцерогенного риска образования хлорорганических соединений. Тем самым предлагаемый подход позволит усовершенствовать существующую систему хлорирования и установить более жесткий контроль над такими параметрами качества питьевой воды, как остаточный хлор и содержание хлорорганических соединений в питьевой воде. Кроме того, внедрение данной системы позволяет уйти от этапа вторичного хлорирования в процессе водоподготовки, поэтому делает его предпочтительней по сравнению с типовыми системами регулирования дозы хлора.

Библиографический список

1. Ушакова, Т. И. Стойкие хлорорганические соединения как фактор риска развития рака молочной железы / Т. И. Ушакова, Б. А. Ревич, Е. М. Аксель, В. Ф. Левшин // Вопросы онкологии. – 2002. – № 3 (48). – С. 293–300.
2. Гигиеническая характеристика риска влияния качества воды на здоровье населения крупного промышленного центра / Т. К. Валеев, Р. А. Сулейманов, Н. Н. Егорова, З. Б. Бактыбаева, Н. Р. Рахматуллин, Д. А. Сырыгина // Медицина труда и экология человека. – 2016. – № 3 (7). – С. 11–17.
3. The epidemiology and possible mechanisms of disinfection by-products in drinking water / M. J. Nieuwenhuijsen, J. Grellier, R. Smith, N. Iszatt, J. Bennett, N. Best, M. Toledano // Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. – 2009. – С. 4043–4076.
4. Марченко, Б. И. Оценка канцерогенного риска от воздействия хлорорганических соединений питьевой воды / Б. И. Марченко, П. В. Журавлев, Н. К. Плуготаренко, А. И. Юхно // Современные проблемы оценки, прогноза и управления экологическими рисками здоровью населения и окружающей среды, пути их рационального решения : материалы III Междунар. форума Научного совета Российской Федерации по экологии человека и гигиене окружающей среды. – 2018. – С. 238–242.
5. Wyczolkowski, R. The Concept of Intelligent Chlorine Dosing System in Water Supply Distribution Networks / R. Wyczolkowski, M. Piechowski, V. Gładysiak, M. Jasiulewicz-Kaczmarek // Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. – 2019. – DOI 10.1007/978-3-319-97490-3_34.
6. Аналиева, А. У. Интеллектуальные датчики физических величин для интегрированных ON-LINE информационных систем / А. У. Аналиева, Н. В. Громков, Е. А. Ломтев, П. Т. Харитонов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2. – С. 41–47.
7. Солдатова, О. П. Сравнительный анализ алгоритмов генерации баз нечетких продукционных правил на примере решения задачи классификации / О. П. Солдатова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4. – С. 43–48.
8. Юхно, А. И. Разработка алгоритма управления системой автоматизированного дозирования хлора на станциях водоподготовки / А. И. Юхно, Н. К. Плуготаренко // Вестник молодежной науки России. – 2019. – № 2 (8).
9. Юхно, А. И. Нейросетевое моделирование содержания хлороформа в питьевой воде при водоподготовке / А. И. Юхно, Н. К. Плуготаренко // Аналитика. – 2019. – Т. 9, № 3. – С. 236–241.

References

1. Ushakova T. I., Revich B. A., Aksel' E. M., Levshin V. F. *Voprosy onkologii* [Oncology issues]. 2002, no. 3 (48), pp. 293–300. [In Russian]
2. Valeev T. K., Suleymanov R. A., Egorova N. N., Baktybaeva Z. B., Rakhmatullin N. R., Syrygina D. A. *Medsitsina truda i ekologiya cheloveka* [Occupational medicine and human ecology]. 2016, no. 3 (7), pp. 11–17. [In Russian]
3. Nieuwenhuijsen M. J., Grellier J., Smith R., Iszatt N., Bennett J., Best N., Toledano M. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2009, pp. 4043–4076.
4. Marchenko B. I., Zhuravlev P. V., Plugotarenko N. K., Yukhno A. I. *Sovremennye problemy otsenki, prognoza i upravleniya ekologicheskimi riskami zdorov'yu naseleniya i okruzhayushchey sredy, puti ikh ratsional'nogo resheniya: materialy III Mezhdunar. foruma Nauchnogo soveta Rossiyskoy Federatsii po ekologii cheloveka i gigiene okruzhayushchey sredy* [Modern problems of assessment, forecast and management of environmental risks to public health and the environment, ways of their rational solution: proceedings of the III international forum of the Scientific Council of the Russian Federation on human ecology and environmental hygiene]. 2018, pp. 238–242. [In Russian]
5. Wyczolkowski R., Piechowski M., Gładysiak V., Jasiulewicz-Kaczmarek M. *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*. 2019. DOI 10.1007/978-3-319-97490-3_34.
6. Analieva A. U., Gromkov N. V., Lomtev E. A., Kharitonov P. T. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 2, pp. 41–47. [In Russian]
7. Soldatova O. P. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2014, no. 4, pp. 43–48. [In Russian]
8. Yukhno A. I., Plugotarenko N. K. *Vestnik molodezhnoy nauki Rossii* [Bulletin of youth science of Russia]. 2019, no. 2 (8). [In Russian]
9. Yukhno A. I., Plugotarenko N. K. *Analitika* [Analytics]. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 236–241. [In Russian]

Южно Александра Игоревна

аспирант,
Южный федеральный университет
Минобрнауки России
(Россия, г. Ростов-на-Дону,
ул. Большая Садовая, 105/42)
E-mail: a.bachmackaja@gmail.com

Juhno Aleksandra Igorevna

postgraduate student,
Southern Federal University
(105/42 Bol'shaya Sadovaya street,
Rostov-on-Don, Russia)

Образец цитирования:

Южно, А. И. Исследование алгоритма работы информационно-измерительной и управляющей системы контроля качества питьевой воды / А. И. Южно // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 5–11. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-1.

М. В. Панарин, Н. А. Рыбка, А. А. Маслова, В. В. Сергеечев, И. Ю. Загуменнов

ОСНАЩЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВРЕДНЫХ (ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ) ВЕЩЕСТВ АВТОМАТИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ ОБЪЕКТОВ 1-й КАТЕГОРИИ¹

M. V. Panarin, N. A. Rybka, A. A. Maslova, V. V. Sergeechev, I. Yu. Zagumennov

EQUIPMENT OF STATIONARY SOURCES OF HARMFUL (POLLUTANT) SUBSTANCES BY AUTOMATIC MEANS OF CONTROL OF INDUSTRIAL EMISSIONS OF OBJECTS OF THE 1ST CATEGORY

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование проблемы оснащения стационарных источников вредных (загрязняющих) веществ автоматическими средствами контроля промышленных выбросов объектов 1-й категории. **Материалы и методы.** Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды [4, 9–12] в области создания автоматических средств контроля промышленных выбросов, уточненные и разработанные в ходе научно-исследовательской деятельности кафедры аэрологии, охраны труда и окружающей среды Тульского государственного университета. **Результаты.** Инновационно-промышленной группой «СервисСофт» разработана автоматическая система непрерывного контроля вредных выбросов в атмосферу на Аргаяшской ТЭЦ. Приводится схема устройства и работы автоматической системы непрерывного контроля вредных выбросов в атмосферу. **Выводы.** Опыт внедрения автоматизированной системы контроля промышленных выбросов в ОАО «Фортум» филиала «Энергосистема "Урал"» Аргаяшской ТЭЦ свидетельствует о том, что система повышает эффективность работы природоохранной службы предприятия за счет экономии временных, финансовых и интеллектуальных ресурсов.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to study the problem of equipping stationary sources of harmful (polluting) substances with automatic means for controlling industrial emissions of objects of the 1st category. **Materials and methods.** The theoretical and methodological basis of the research was made up of works [4,9,10,11,12], in the field of creating automatic means of controlling industrial emissions, refined and developed during the research activities of the Department of OS and OS TULU. **Results.** The ServiceSoft innovative industrial group has developed an automatic system for continuous monitoring of harmful emissions into the atmosphere at the Argayash TPP. The scheme of the device and operation of an automatic system for continuous monitoring of harmful emissions into the atmosphere is given. **Conclusions.** The experience of introducing an automated industrial emissions control system at Fortum OJSC of the Ural Energy System branch of the Argayash TPP indicates that the system improves the efficiency of the enterprise's environmental service by saving time, financial and intellectual resources.

¹ Материалы подготовлены в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (конкурс МД-2018).

К л ю ч е в ы е с л о в а: атмосфера, атмосферный воздух, выброс, мониторинг, автоматизированная система.

K e y w o r d s: atmosphere, atmospheric air, emission, monitoring, automated system.

Введение

Защита атмосферы от выбросов загрязняющих веществ является важной экологической проблемой современности. Эта проблема приобретает особую актуальность для промышленных городов, где атмосферные загрязнения оказывают негативное влияние на здоровье, благосостояние и продолжительность жизни людей, приводят к развитию необратимых для природы последствий.

Именно поэтому внедрение новых и усовершенствование существующих систем мониторинга атмосферы является одним из основных направлений реформирования системы государственной власти и управления Российской Федерации в области природопользования и охраны окружающей среды [1, 2].

Несмотря на обязательный характер информатизации процессов мониторинга, а также поддержки и принятия управленческих решений в сфере охраны атмосферного воздуха, анализ действующих систем мониторинга атмосферы на различных уровнях управления демонстрирует острую нехватку аппаратно-технического оснащения.

На практике используются в основном лабораторные методы контроля, основанные на «ручном» отборе проб и их анализе на устаревшем оборудовании. Практически отсутствуют современные мобильные, автоматизированные средства за контролем выбросов в атмосферный воздух, программно-аппаратные комплексы сбора, обработки данных мониторинга атмосферного воздуха, формирования прогнозов и поддержки принятия управленческих решений.

В связи с чем на государственном уровне в России разработаны и реализуются Федеральная и входящие в нее региональные целевые программы «Охрана окружающей среды на 2012–2020 годы» (далее – Программа), одной из задач которой является «повышение эффективности функционирования системы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды». На первом месте среди всех целевых индикаторов программы находятся индикаторы охраны атмосферного воздуха:

- объем выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников на единицу ВВП (тонн на млн рублей ВВП);
- количество городов с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (единиц);
- численность населения, проживающего в неблагоприятных экологических условиях (в городах с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (индекс загрязнения атмосферного воздуха более 7) (млн человек) [3].

В ответ на поставленные Программой задачи Правительство Российской Федерации подготовило ряд нормативных документов, в том числе и проект Постановления «Об утверждении перечня стационарных источников и перечня вредных (загрязняющих) веществ, подлежащих контролю посредством автоматических средств измерения и учета объема или массы выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, концентрации вредных (загрязняющих) веществ в таких выбросах, а также технических средств передачи информации об объеме или о массе таких выбросов, о концентрации вредных (загрязняющих) веществ в таких выбросах» (далее – проект постановления).

Согласно проекту на объектах 1-й категории, т.е. объектах, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду и относящихся к областям применения наилучших доступных технологий (НДТ), стационарные источники выбросов вредных (загрязняющих) веществ должны быть оснащены автоматическими средствами измерения и учета объема или массы выбросов, концентрации загрязняющих веществ, а также техсредствами фиксации и передачи указанной информации в госфонд данных государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды) [3, 4].

В разработанный перечень стационарных источников и вредных (загрязняющих) веществ, подлежащих контролю, были включены источники выбросов таких производств, как добыча сырой нефти и природного газа; производство нефтепродуктов, кокса; обеспечение электроэнергией, газом и паром; металлургическое производство; производство неметалличе-

ской минеральной продукции, химических веществ и химических продуктов, пестицидов, целлюлозы, древесной массы, бумаги и картона; деятельность по обезвреживанию отходов.

Принимая во внимание вышеперечисленные обстоятельства, природоохранные службы предприятий должны инициировать разработку заданий на проектирование автоматических средств контроля промышленных выбросов (АСКПВ), сфокусировавшись на крупных стационарных источниках выбросов загрязняющих веществ, которые подлежат инструментальному контролю в автоматическом режиме.

Учитывая, что объекты 1-й категории относятся к областям применения НДТ, при формировании требований к АСКПВ целесообразно использовать информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Общие принципы производственного экологического контроля и его метрологического обеспечения», который содержит достаточно полный обзор парка измерительных средств, методик измерений и требований к метрологическим характеристикам АСКПВ [5, 6].

Цель работы: разработка структуры системы автоматического непрерывного контроля вредных выбросов в атмосферу.

Материалы и методы. Теоретическую и методологическую основу исследований составили труды в области создания автоматических средств контроля промышленных выбросов [4, 7–10], уточненные в ходе научно-исследовательской деятельности кафедры ОТ и ОС ТулГУ и применяемые в настоящее время в работе Инновационно-промышленной группы «СервисСофт» при создании элементов систем мониторинга атмосферы.

Результаты и их обсуждение. Техническим решением проблемы оснащения стационарных источников вредных (загрязняющих) веществ автоматическими средствами контроля промышленных выбросов объектов 1-й категории стала автоматизированная система измерения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в ОАО «Фортум» филиала Энергосистема «Урал» Аргаяшской ТЭЦ, разработанная инновационно-промышленной группой, устройство и работа которой представлено на рис. 1. Структурная схема системы изображена на рис. 2.

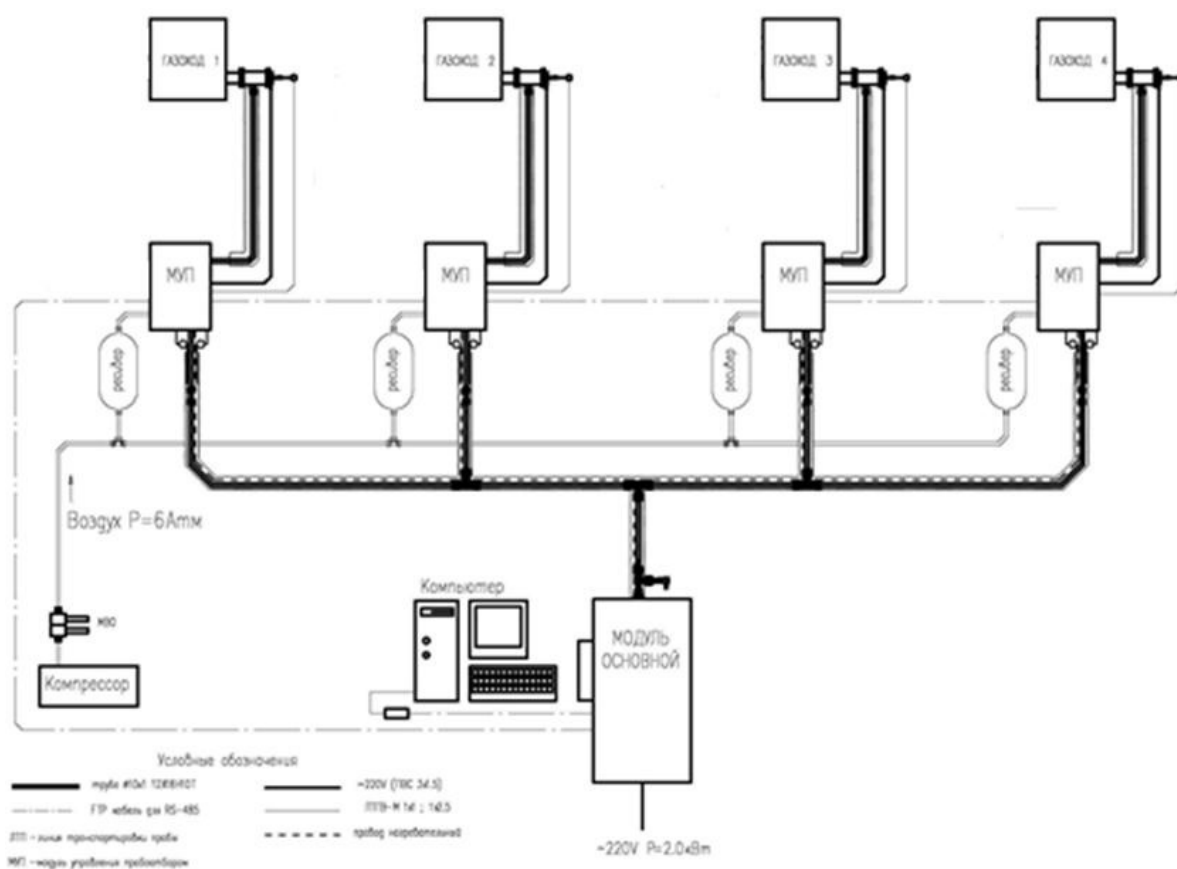


Рис. 1. Устройство и работа автоматической системы непрерывного контроля вредных выбросов в атмосферу на Аргаяшской ТЭЦ

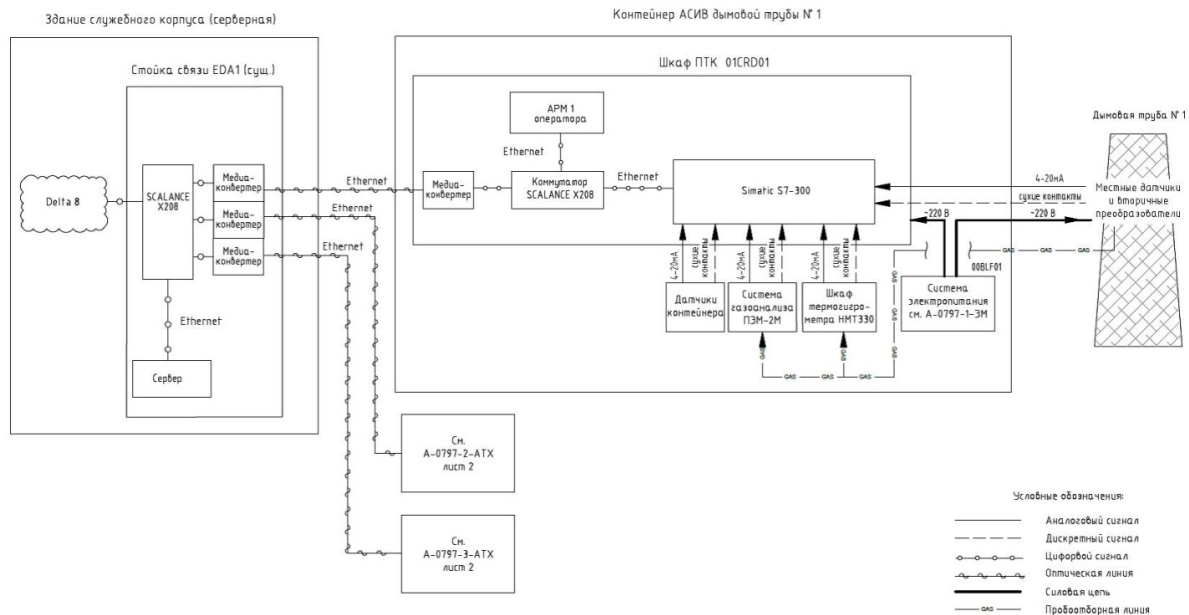


Рис. 2. Структурная схема непрерывного контроля вредных выбросов в атмосферу дымовой трубы № 1

В состав АСИВ входят четыре точки измерения (ТИ):

- дымовая труба № 1 (условно ДТ № 1);
- дымовая труба № 2 (условно ДТ № 2);
- дымовая труба № 3 (условно ДТ № 3);
- дымовая труба № 4 (условно ДТ № 4).

АСИВ создается как иерархическая двухуровневая интегрированная автоматизированная измерительная система, в состав которой входят:

- уровень измерительных компонентов измерительной системы (измерительный компонент ИС);
- уровень вычислительных компонентов измерительной системы (вычислительный компонент ИС);
- вспомогательные компоненты измерительной системы (вспомогательный компонент ИС).

Оборудование измерительных компонентов измерительной системы выполняет следующие функции:

- измерения абсолютного давления дымовых газов, кПа;
- измерения температуры дымовых газов, °C;
- измерения объемного расхода дымовых газов, м³/ч;
- измерение объемной доли кислорода (O₂), %;
- измерение объемной доли диоксида углерода (CO₂), %;
- измерение концентрации оксида углерода (CO), мг/м³;
- измерение концентрации оксида азота (NO), мг/м³;
- измерение концентрации диоксида азота (NO₂), мг/м³;
- измерение концентрации диоксида азота (SO₂), мг/м³;
- измерение концентрации твердых (взвешенных) частиц, мг/м³;
- измерение концентрации влажности (H₂O), %;
- расчет объемного расхода сухих газов, м³/ч.

Уровень вычислительных компонент ИС обеспечивает автоматический сбор, диагностику и автоматизированную обработку информации по анализу дымовых газов в сечении газохода, автоматизированный сбор и обработку информации, а также обеспечивает интерфейс доступа к этой информации.

Нижний уровень системы обеспечивает автоматическое и по командам с верхнего уровня управление технологическим оборудованием. Верхний уровень обеспечивает сбор данных о состоянии оборудования путем опроса нижнего уровня, визуализацию состояния оборудо-

вания, дистанционное управление оборудованием, обработку данных, формирование и печать отчетных документов.

Нижний уровень реализован на базе контроллера S7-300. Верхний уровень реализован на базе операторской станции. Связь уровней системы реализуется с помощью сети Ethernet.

Газоотборный зонд АСИВ выполняет функцию отбора проб газа из горизонтальных и вертикальных труб (дымоходов). Фото газоотборного зонда вместе с трубой представлено ниже (рис. 3).



Рис. 3. Газоотборный зонд

Измерения выполняются анализаторами и иными средствами измерений, входящими в комплект системы «АСИВ».

Метод измерения массовой концентрации NO , NO_2 , CO , CO_2 , SO_2 основан на принципе действия газоанализатора – оптический абсорбционный в инфракрасной области спектра поглощения газов NO , NO_2 , CO , CO_2 , SO_2 (измерение ослабления светового потока в рабочем канале в выбранном (светофильтром) спектральном интервале). Метод измерения объемной доли O_2 основан на электрохимическом эффекте. Измерения проводят с помощью газоанализатора ПЭМ-2М. Результаты измерений массовых концентраций веществ газоанализатор ПЭМ-2М выдает приведенными к нормальным условиям (далее – н.у., соответствуют 0°C ; $101,3\text{ кПа}$ согласно ГОСТ Р ИСО 8756–2005).

Метод измерения относительной влажности основан на сорбционном методе. Термогигрометр НМТ335 имеет сенсор влажности емкостного типа и платиновый сенсор температуры Pt100. НМТ335 имеет измерительный канал относительной влажности и температуры с установленными характеристиками погрешности.

Измерение температуры потока в газоходе осуществляется термопреобразователем сопротивления Метран-2000 и контроллером, программируемым Siemens SIMATIC S7-300.

Измерение абсолютного давления осуществляется преобразователем (датчиком) давления измерительным EJX510A и контроллером, программируемым Siemens SIMATIC S7-300.

Принцип действия измерителя скорости газа ИС-14.М основан на измерении корреляционным методом времени перемещения через определенный участок пути локальной неоднородности газового потока. Косвенное измерение объемного расхода газа производится расчетом по измеренной скорости дымовых газов в трубе с учетом заданной площади измерительного сечения дымовой трубы в контроллере программируемом Siemens SIMATIC S7-300.

Информационно-вычислительный комплекс системы (ИВК) обеспечивает автоматический сбор, диагностику и автоматизированную обработку информации по анализу выходных газов в сечении газохода, автоматизированный сбор и обработку информации с усреднением по заданному оператором интервалу, а также обеспечивает интерфейс доступа к этой информации. В состав ИВК входят программно-технический комплекс (ПТК) на базе контроллеров программируемых Siemens SIMATIC S7-300 и АРМ на базе промышленного компьютера SIEMENS SIMATIC IPC547C с программным обеспечением.



Рис. 4. Интерфейс программно-технического комплекса на базе контроллеров, программируемых Siemens SIMATIC S7-300

В состав программно-технического комплекса входят:

- контроллер;
- операторская станция: АРМ оператора.

Программное обеспечение контроллеров работает на базе встроенной операционной системы реального времени контроллера и реализуется в соответствии с документом «Описание алгоритма А-0797-1-ПБ».

На операторской станции на базе промышленного компьютера устанавливается следующее программное обеспечение и лицензии:

- WinCC 7.3 Software;
- Windows 7.

Измерения всех величин проводят одновременно. Результаты 20-минутных измерений хранятся в архиве (памяти компьютера). Измерительная система подразумевает длительную эксплуатацию. Необходимо избегать частых и кратковременных отключений.

Измерительно-вычислительный комплекс ИВК позволяет перенести полученные значения измеряемых величин (давление в кПа, температуры в °С, влажность относительная дымовых газов, концентраций веществ в мг/м³, скорость дымовых газов м/с, расхода дымовых газов в м³/с, расхода вредных веществ в г/с, г/ч) в программу Microsoft Excel для формирования протоколов измерений и расчетных данных (массовых выбросов г/сут, т/год) по форме, принятой предприятием и дальнейших расчетов. Протокол (распечатка) результатов измерений

массовой концентрации (объемной доли) компонентов и параметров газового потока с применением программного обеспечения должен соответствовать числу знаков, соответствующим показаниям дисплея приборов. Периодичность распечатки протокола определяется в соответствии с планом-графиком предприятия.

Заключение

Опыт внедрения автоматизированной системы контроля промышленных выбросов в ОАО «Фортум» филиала «Энергосистема "Урал"» Аргаяшской ТЭЦ свидетельствует о том, что система повышает эффективность работы природоохранной службы предприятия за счет экономии временных, финансовых и интеллектуальных ресурсов [6, 11, 12].

Тем не менее основная часть работы по внедрению автоматических систем контроля промышленных выбросов 1-й категории на предприятиях Российской Федерации еще только впереди. Такие мероприятия в значительной мере будут способствовать в решении ключевой проблемы – оздоровления воздушного бассейна и окружающей среды в целом.

Библиографический список

1. *Панарин В. М.* Информационно-измерительная и управляющая система районирования территорий промышленного региона по комплексным показателям метеорологических условий загрязнения атмосферы / В. М. Панарин, Н. А. Рыбка // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2017. – № 12. – С. 41–47.
2. Проект Постановления Правительства Российской Федерации «Об определении перечня стационарных источников и перечня вредных (загрязняющих) веществ, подлежащих контролю посредством автоматических средств измерения и учета объема или массы выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, концентрации вредных (загрязняющих) веществ в таких выбросах, а также технических средств передачи информации об объеме или о массе таких выбросов, о концентрации вредных (загрязняющих) веществ в таких выбросах» (подготовлен Минприроды России 11.12.2015). – Москва, 2015.
3. *Лукьянов, О. В.* Оснащение стационарных источников выбросов автоматическими средствами контроля / О. В. Лукьянов, М. В. Баюкин, К. К. Нечехин // Экология производства. – 2017. – № 6. – С. 24–28.
4. Система автоматизированного контроля температуры и загазованности для дистанционного мониторинга состояния утилизированной свалки коммунальных отходов / А. А. Маслова, В. М. Панарин, К. В. Гришаков, Н. А. Рыбка, Д. А. Селезнева // Экология и промышленность России. – 2018. – Т. 22, № 11. – С. 14–18.
5. *Панарин, В. М.* Способы регистрации метеопараметров, расчета и отображения метеопоказателей в информационно-измерительной и управляющей системе районирования территорий промышленного региона по загрязнению атмосферы / В. М. Панарин, А. А. Маслова, Н. А. Рыбка, Г. Ю. Царьков // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2018. – № 11. – С. 26–31.
6. *Панарин, В. М.* Разработка автономных станций и системы контроля загрязнения атмосферного воздуха / В. М. Панарин, А. А. Горюнкова, К. В. Гришаков // Экологические системы и приборы. – 2017. – № 9. – С. 21–27.
7. Применение искусственных нейронных сетей для прогнозирования уровней загрязнения воздуха и водных объектов / А. А. Маслова, В. М. Панарин, К. В. Гришаков, Н. А. Рыбка, Е. А. Котова, Д. А. Селезнева // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23, № 8. – С. 36–41.
8. Автоматизированная система удаленного экологического мониторинга на промышленных объектах / М. В. Панарин, А. А. Маслова, Н. А. Рыбка, Е. М. Рылеева, К. В. Гришаков // Экологические системы и приборы. – 2019. – № 6. – С. 9–13.
9. *Панарин, В. М.* Определение пространственной структуры системы мониторинга загрязнения водных объектов и атмосферного воздуха / В. М. Панарин, А. А. Маслова, К. В. Гришаков, Н. А. Рыбка // Современные проблемы экологии : сб. докл. XXII Междунар. науч.-практ. конф. – Тула, 2019. – С. 108–111.
10. *Панарин, В. М.* Прогнозирование загрязнения атмосферного воздуха промышленного региона в информационно-измерительных и управляющих системах мониторинга атмосферы / В. М. Панарин, Н. А. Рыбка, А. А. Маслова // Экологические системы и приборы. – 2019. – № 5. – С. 18–24.
11. *Мешалкин, В. П.* Расчет интегрального показателя опасности химического объекта / В. П. Мешалкин, В. М. Панарин, К. В. Гришаков, А. А. Горюнкова // Логистика и экономика ресурсоэнергосбережения в промышленности (МНПК «ЛЭРЭП-11-2017») : сб. науч. тр. по материалам XI Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т им. Ю. А. Гагарина, 2017. – С. 228–231.

12. Meshalkin, V. P. Computer modeling of the chemical-power engineering process of roasting of a moving multilayer mass of phosphorite pellets / V. P. Meshalkin, S. M. Khodchenko, V. I. Bobkov, M. I. Dli // *Doklady Chemistry*. – 2017. – Vol. 477, № 2. – C. 282–285.

References

1. Panarin V. M., Rybka N. A. *Pribory i sistemy. Upravlenie. Kontrol'. Diagnostika* [Devices and systems. Management. Control. Diagnostics]. 2017, no. 12, pp. 41–47. [In Russian]
2. *Proekt Postanovleniya Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii «Ob opredelenii perechnya statsio-narnykh istochnikov i perechnya vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv, podlezhashchikh kontrolyu posredstvom avtomaticheskikh sredstv izmereniya i ucheta ob"ema ili massy vybrosov vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v atmosferynyy vozdukh, kontsentratsii vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v takikh vybrosakh, a takzhe tekhnicheskikh sredstv peredachi informatsii ob ob"eme ili o masse takikh vybrosov, o kontsentratsii vrednykh (zagryaznyayushchikh) veshchestv v takikh vybrosakh» (podgotovlen Minprirody Rossii 11.12.2015)* [The draft resolution of the Government of the Russian Federation "About determination of the list of stationary sources and the list of harmful (polluting) substances subject to control by automatic means of measurement and recording of volume or mass of emissions of harmful (polluting) substances in atmospheric air, concentrations of harmful substances (pollutants) in such emissions, as well as technical means of information transfer about volume / mass of such emissions, the concentration of harmful substances (pollutants) in such emissions" (prepared by the Ministry of natural resources 11.12.2015)]. Moscow, 2015. [In Russian]
3. Luk'yanov O. V., Bayukin M. V., Necheukhin K. K. *Ekologiya proizvodstva* [Production ecology]. 2017, no. 6, pp. 24–28. [In Russian]
4. Maslova A. A., Panarin V. M., Grishakov K. V., Rybka N. A., Selezneva D. A. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry in Russia]. 2018, vol. 22, no. 11, pp. 14–18. [In Russian]
5. Panarin V. M., Maslova A. A., Rybka N. A., Tsar'kov G. Yu. *Promyshlennye ASU i kontrolyery* [Industrial ACS and controllers]. 2018, no. 11, pp. 26–31. [In Russian]
6. Panarin V. M., Goryunkova A. A., Grishakov K. V. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Environmental systems and devices]. 2017, no. 9, pp. 21–27. [In Russian]
7. Maslova A. A., Panarin V. M., Grishakov K. V., Rybka N. A., Kotova E. A., Selezneva D. A. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry in Russia]. 2019, vol. 23, no. 8, pp. 36–41. [In Russian]
8. Panarin M. V., Maslova A. A., Rybka N. A., Ryleeva E. M., Grishakov K. V. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Environmental systems and devices]. 2019, no. 6, pp. 9–13. [In Russian]
9. Panarin V. M., Maslova A. A., Grishakov K. V., Rybka N. A. *Sovremennye problemy ekologii: sb. dokl. XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern problems of ecology: collection of reports of the XXII International scientific and practical conference]. Tula, 2019, pp. 108–111. [In Russian]
10. Panarin V. M., Rybka N. A., Maslova A. A. *Ekologicheskie sistemy i pribory* [Environmental systems and devices]. 2019, no. 5, pp. 18–24. [In Russian]
11. Meshalkin V. P., Panarin V. M., Grishakov K. V., Goryunkova A. A. *Logistika i ekonomika resursoener-gosberezheniya v promyshlennosti (MNPk «LEREP-11-2017»): sb. nauch. tr. po materialam KhI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Logistics and Economics of resource and energy saving in industry (ler-ep-11-2017): collection of scientific papers based on the materials of the XI International scientific and practical conference]. Saratov: Saratov. gos. tekhn. un-t im. Yu. A. Gagarina, 2017, pp. 228–231. [In Russian]
12. Meshalkin V. P., Khodchenko S. M., Bobkov V. I., Dli M. I. *Doklady Chemistry*. 2017, vol. 477, no. 2, pp. 282–285.

Панарин Михаил Владимирович

кандидат технических наук,
генеральный директор,
АО Группа компаний «СервисСофт»
(Россия, г. Тула, ул. Щегловская засека, 30)
E-mail: Pmv@ssoft24.com

Panarin Mihail Vladimirovich

candidate of technical sciences,
general director,
JSC ServiceSoft Group of Companies
(30 Scheglovskaya zaseka street, Tula, Russia)

Рыбка Надежда Александровна

аспирант,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-т Ленина, 92)
E-mail: nipk.ecolog@mail.ru

Rybka Nadezhda Aleksandrovna

postgraduate student,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Маслова Анна Александровна

доктор технических наук, доцент,
кафедра аэрологии, охраны труда
и окружающей среды,
Тульский государственный университет
(Россия, г. Тула, пр-т Ленина, 92)
E-mail: anna_zuykova@rambler.ru

Maslova Anna Aleksandrovna

doctor of technical sciences, associate professor,
sub-department of aerology and protection of labour
and the environment,
Tula State University
(92 Lenin avenue, Tula, Russia)

Сергеечев Вадим Викторович

генеральный директор,
ООО «СервисСофт Инжиниринг ТулГУ»
(Россия, г. Тула, ул. Революции, 35а)
E-mail: SVV@ssoft24.com

Sergeechev Vadim Viktorovich

general director,
LLC Servicesoft Engineering TulSU
(35a Revolyutsii street, Tula, Russia)

Загуменнов Иван Юрьевич

руководитель направления
экологического мониторинга,
АО Группа компаний «СервисСофт»
(Россия, г. Тула, ул. Щегловская засека, 30)
E-mail: as25@ssoft24.com

Zagumennov Ivan Yur'evich

head of environmental monitoring,
JSC ServiceSoft Group of Companies
(30 Scheglovskaya zaseka street, Tula, Russia)

Образец цитирования:

Оснащение стационарных источников вредных (загрязняющих) веществ автоматическими средствами контроля промышленных выбросов объектов 1-й категории / М. В. Панарин, Н. А. Рыбка, А. А. Маслова, В. В. Сергеечев, И. Ю. Загуменнов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 12–20. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-2.

*Т. Ю. Бростилова, В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев,
А. А. Тихомирова, О. К. Абдирашев*

МЕТОДИКА АНАЛИЗА СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*T. Yu. Brostilova, V. Ya. Goryachev, D. I. Nefed'ev,
A. A. Tikhomirova, O. K. Abdirashev*

METHOD OF ANALYSIS OF SYSTEMATIC ERROR OF INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF DISPLACEMENTS BASED ON LINEAR DISPLACEMENT SENSOR FOR ELECTRIC POWER SYSTEMS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В настоящее время при разработке информационно-измерительных систем механических величин недостаточное внимание уделяется анализу систематической погрешности и определению требований к метрологическим характеристикам отдельных блоков информационно-измерительной системы (ИИС) и конструктивным параметрам первичных преобразователей. Решению этой проблемы и посвящена данная статья. Объектом исследования является информационно-измерительная система линейных перемещений на базе датчика линейных перемещений (ДЛП) с бегущим магнитным полем, предназначенным для использования в электроэнергетических системах. Целью работы является разработка методики анализа систематической погрешности измерительной системы для определения требований к метрологическим характеристикам ее элементов и конструктивным параметрам ДЛП. **Материалы и методы.** Для решения проблемы формирования требований к заданным параметрам составных частей ИИС с датчиками линейных перемещений авторами предлагается модель системы, построенная на основе методологии построения имитационных систем. Предлагаемая имитационная модель отличается возможностью представления процесса функционирования информационно-измерительной системы в целом. Имитационная модель ИИС реализована в форме программы в среде MatLAB, которая позволяет проводить однофакторные и многофакторные эксперименты. В результате идет накопление экспериментальных данных, происходит обработка и анализ данных, выдается необходимая информация. Для анализа систематической погрешности ИИС используется разложение абсолютных погрешностей от действия отдельных факторов на ортогональные составляющие. Речь идет о коэффициентах Фурье. Использование ортогонального многомерного пространства позволяет определить результирующую систематическую погрешность ИИС по заданным точностным и конструктивным характеристикам элементов системы или сформировать требования к характеристикам элементов ИИС, при которых система будет иметь заданную систематическую погрешность. **Результаты.** Предложена методи-

ка анализа систематической погрешности информационно-измерительной системы линейных перемещений, реализованной на базе ДЛП. Для получения абсолютных погрешностей от действия влияющих факторов разработана имитационная модель информационно-измерительной системы в форме программы в среде MatLAB. Предложенная методика дала положительные результаты при исследовании информационно-измерительной системы линейных перемещений на базе ДЛП для электроэнергетических систем с помощью моделирования на компьютере. **Выводы.** При проектировании информационно-измерительной системы линейных перемещений на базе ДЛП для электроэнергетических систем возможно использование методики анализа систематической погрешности для формирования требований к параметрам и конструктивным характеристикам элементов системы, при которых система будет иметь заданную систематическую погрешность. Для реализации этой методики рекомендуется использовать имитационную модель.

A b s t r a c t. Background. Currently, in the development of information and measurement systems (IIS) of mechanical quantities, insufficient attention is paid to the analysis of systematic error and the definition of requirements for the metrological characteristics of individual blocks of IIS and design parameters of primary converters. The article considers the solution of this problem. The object of the study is an information-measuring system of linear displacements based on a linear displacement sensor (SDL) with a traveling magnetic field intended for use in electric power systems. The aim of the work is to develop a methodology for analyzing the systematic error of the measuring system to determine the requirements for the metrological characteristics of its elements and design parameters of the SDL. **Materials and methods.** A simulation model of the system is developed to solve the problem of forming requirements for the characteristics of elements and systems of linear displacements. The simulation model allows us to imagine the process of functioning of the information and measurement system as a whole. The simulation model is implemented in the form of a program in MatLAB, which allows one-factor and multi-factor experiments. As a result, experimental data are accumulated, data are processed and analyzed, and the necessary information is provided. To analyze the systematic error of the IIS, the decomposition of absolute errors from the action of individual factors into orthogonal components is used. We are talking about Fourier coefficients. The use of orthogonal multidimensional space makes it possible to determine the resulting systematic error of the system by the specified accuracy and design characteristics of the system elements or to form requirements for the characteristics of the elements of the system, in which the system will have a given systematic error. **Results.** The method of analysis of systematic error of information-measuring system of linear displacements realized on the basis of SDL is offered. To obtain absolute errors from influencing factors, a simulation model of the information and measurement system in the form of a program in the Mat-LAB environment was developed. The proposed method gave positive results in the study of information-measuring system of linear displacements on the basis of SDL for electric power systems with the help of computer modeling. **Conclusions.** When designing the information-measuring system of linear changes on the basis of SDL for electric power systems, it is possible to use the method of systematic error analysis to form requirements for the parameters and design characteristics of the system elements, in which the system will have a given systematic error. To implement this technique, it is recommended to use a simulation model.

К л ю ч е в ы е с л о в а: информационно-измерительная система линейных перемещений, имитационная модель, дисперсия, ортогональное пространство, систематическая погрешность, датчик линейных перемещений, коэффициенты Фурье.

Key words: information-measuring system of linear displacements, simulation model, dispersion, orthogonal space, systematic error, linear displacement sensor, Fourier coefficients.

Введение

При разработке информационно-измерительной системы (ИИС) линейных перемещений на базе датчика линейных перемещений (ДЛП) [1, 2] с бегущим магнитным полем возникает необходимость формирования требований к параметрам узлов системы, при которых она обеспечит измерение с заданной погрешностью. Очевидно то, что формированием требований к параметрам узлов ИИС можно воздействовать только на систематическую погрешность системы.

На рис. 1 представлена блок-схема ИИС перемещений на основе ДЛП с бегущим магнитным полем.

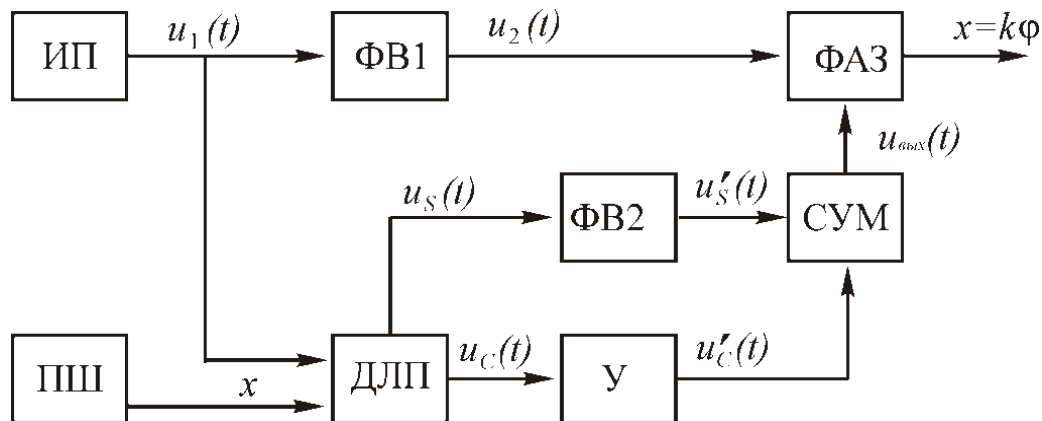


Рис. 1. Блок-схема ИИС перемещений на основе ДЛП с бегущим магнитным полем

На блок-схеме: ИП – источник переменного тока частотой f и выходным напряжением $u_1(t)$; ПШ – положение магнитного шунта относительно информационной линейки фазовращателя, которое определяет измеряемое перемещение; ФВ1 – фазовращатель напряжения генератора для установки нуля; ДЛП – датчик линейных перемещений; ФВ2 – фазовращатель, смещающий фазу напряжения синусной обмотки на 90° и обеспечивающий предварительное усиление этого выходного напряжения; У – дискретный или интегральный усилитель амплитудного значения напряжения косинусной обмотки; СУМ – сумматор выходных напряжений синусной и косинусной обмоток; ФАЗ – фазометр, предназначенный для измерения фазового сдвига выходного напряжения сумматора относительно опорного напряжения u_2 , полученные значения соответствуют измеряемому перемещению.

Погрешность преобразования сигнала каждого элемента ИИС вносит свою составляющую в результирующую погрешность системы.

К факторам, влияющим на систематическую погрешность ИИС, можно отнести: погрешность фазовращателя установки «нуля» – ФВ1, погрешность поворота фазы синусоидального напряжения на 90° – ФВ2, погрешность усилителя косинусного выходного напряжения ДЛП – У, погрешность сумматора – СУМ. На погрешность оказывает влияние точность изготовления элементов информационной линейки ДЛП: точность изготовления пазов магнитопровода линейки, дискретность количества витков обмоток, количество пазов линейки и другие параметры.

Таким образом, важной задачей проектирования ИИС заключается, с одной стороны, в обосновании требований к узлам системы, обеспечивающим функционирование фазовых датчиков, с другой стороны, в определении погрешности изготовления базовых элементов датчика с целью разработки измерительной системы с определенной систематической погрешностью.

Пути решения проблемы и имитационная модель ИИС

В теории создания имитационных моделей ИИС широкое распространение и признание специалистов получил ряд методов, которые позволяют обосновать как адекватность разработанной модели в общем, так и ее метрологические характеристики в частности.

В первую очередь необходимо отметить широко апробированный метод, основой которого является применение эмпирически полученных в результате оценки функционирования готовых изделий с учетом результатов их метрологических испытаний. Между тем известно, что данный подход приводит к существенному увеличению материальных затрат на ранних стадиях разработки изделия, что, в свою очередь, снижает экономическую эффективность всего процесса проектирования.

Второй способ отчасти решает проблему повышенных материальных затрат, основан на получении и всестороннем анализе функции преобразования информационно-измерительной системы. Способ позволяет достоверно определить степень влияния внешних воздействующих факторов на метрологические параметры ИИС, в частности на ее точность. Однако, как и в первом случае, приведенный метод имеет ряд существенных недостатков, серьезно ограничивающих его применение:

а) крайне тяжело, а в отдельных случаях невозможно получить адекватное аналитическое выражение для эффективного определения зависимости результирующей погрешности системы от влияния как внутренних, так и внешних факторов, главными из которых и одновременно наиболее сложными являются конструктивные параметры как отдельных элементов, так и узлов датчика. Это связано с применением функции преобразования;

б) как правило, не представляется возможным формализовать в полном объеме конструктивные параметры как первичного преобразователя, но и прежде всего датчика. Это обстоятельство в процессе получения функции преобразования ИИС приводит к неадекватному учету влияния факторов на погрешность ИИС в целом;

в) функция преобразования дает возможность произвести анализ выходных данных датчика только в том случае, если характеристики системы измерения заданы ранее. Прямо противоположная же задача, когда необходимо найти величину отклонений характеристик, обеспечивающих необходимую погрешность, требует гораздо больших трудозатрат, времени или же попросту невыполнима.

Сущность третьего метода определяется в применении предлагаемой авторами имитационной модели ИИС, разработанной с учетом хорошо исследованных физических процессов, происходящих в ДЛП и других узлах системы. Не вызывает сомнения, что третий метод является более подходящим и имеет несомненное преимущество, не только относящееся к его доступности, но и заключающееся в возможности выработать рекомендации для проектирования ИИС на основе датчиков линейных перемещений с существенной экономией времени.

В результате исследования авторы, используя методологию построения имитационных систем, предлагают модель ИИС, построенную на основе датчиков линейных перемещений на базе ДЛП с бегущим магнитным полем. На рис. 2 показана блок-схема алгоритма имитационной модели.

Влияние различных факторов на погрешность ИИС линейных перемещений

К параметрам измерительной системы, которые влияют на результирующую погрешность устройства, можно отнести следующие факторы:

- неравенство коэффициентов усиления выходных напряжений синусной и косинусной обмоток;
- погрешность поворота фазы фазовращателя ФВ2 на 90°;
- неравенство активных и реактивных сопротивлений цепей синусной и косинусной обмотки;
- погрешность фазовращателя ФВ1;
- нестабильность частоты генератора.

К конструктивным влияющим факторам относятся:

- дискретность количества зубцов датчика;
- точность изготовления шунта датчика;
- погрешность нанесения пазов информационной линейки;
- дискретность количества витков;
- изменение воздушного зазора шунта вдоль линейки;
- изменение равномерности зазора при перемещении шунта;
- изменение параметров магнитной цепи в зоне расположения магнитного шунта при его перемещении.

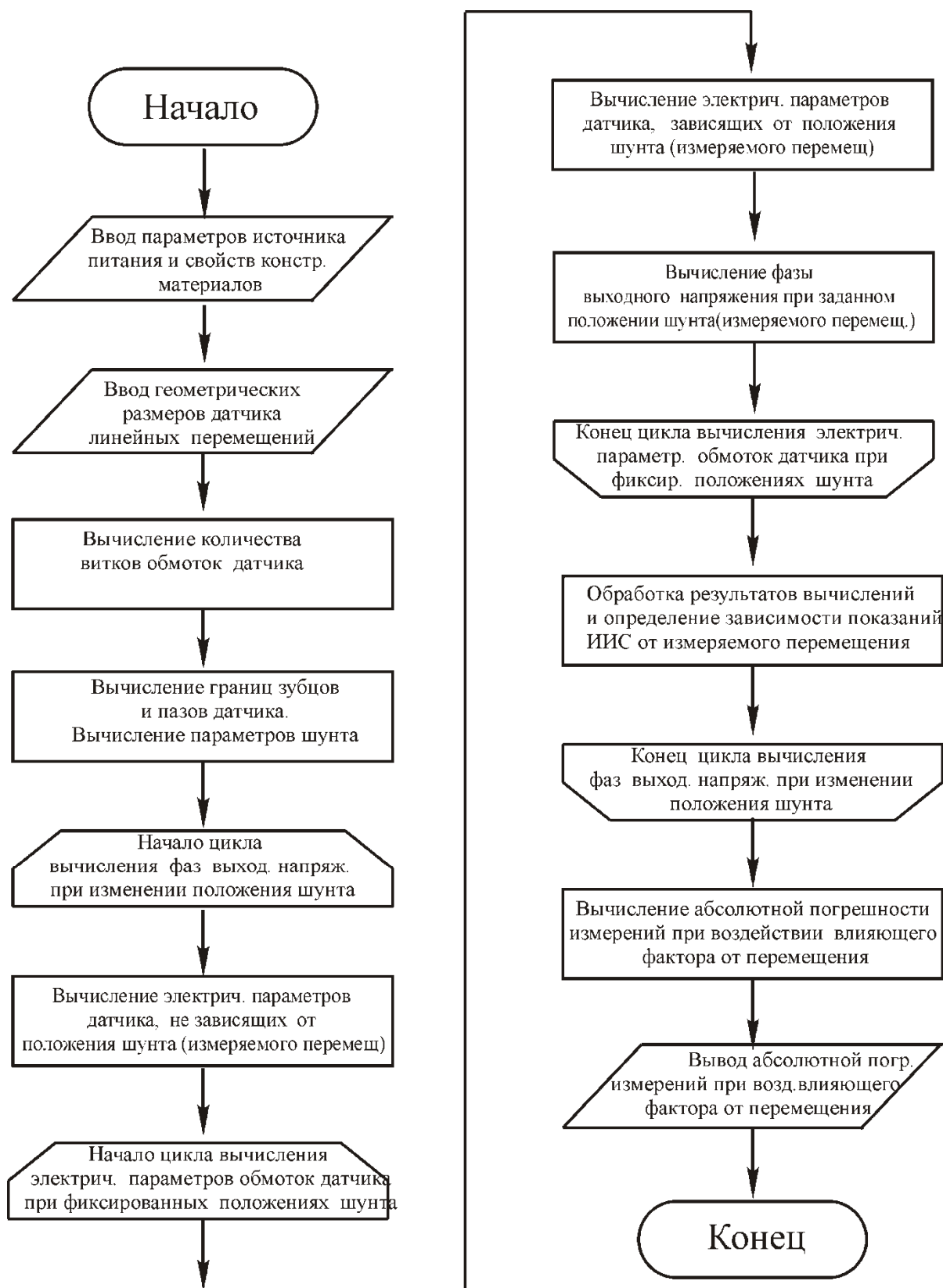


Рис. 2. Блок-схема алгоритма имитационной модели

В качестве примера ниже рассматривается информационно-измерительная система линейных перемещений 160 мм.

Определение влияния разности усиления выходных напряжений синусной и косинусной обмотки ДЛП на погрешность ИИС.

При разности максимальных амплитуд в 1% максимальное отклонение угла приближенно составляет 0,005 радиан, что подтверждается графиком (рис. 3), полученным путем использования имитационной модели. Закон изменения определяется практически синусоидальной функцией перемещения, период которой равен половине длины измерительной линейки.

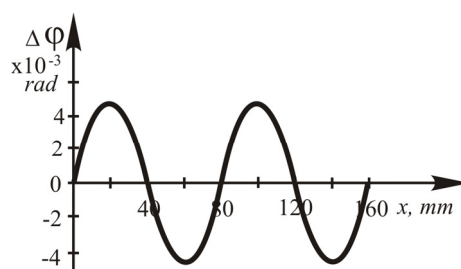


Рис. 3. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различной степени усиления выходного сигнала

Влияние дискретности количества витков информационной линейки

К появлению погрешности датчика приводит и неидеальное количество витков синусной и косинусной обмоток на каждом конкретном участке, так как количество витков не может быть дробным. Степень влияния отклонения количества витков от расчетного значения различна только для четверти участков (рис. 4). Как видно из рисунка, изменение фазы намагничивающей силы в части ее отклонения от принятого за идеальное значение на каждом контрольном промежутке принимает различные значения и изменяется по периодическому закону.

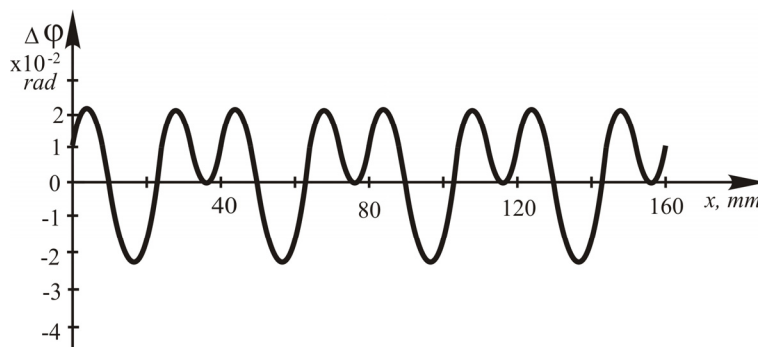


Рис. 4. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различном количестве витков информационной линейки

Влияние количества зубцовых делений на погрешность датчика

Природа появления погрешности, обусловленная ограниченным числом зубцов измерительной линейки, заключается в том, что количество зубцов конечно.

Дискретность распределения намагничивающих сил информационной линейки приводит к погрешности измерений, обусловленных этим фактором. На рис. 5 показана зависимость отклонения фазы входного напряжения фазометра от линейного закона, обусловленная дискретностью количества зубцов линейки.

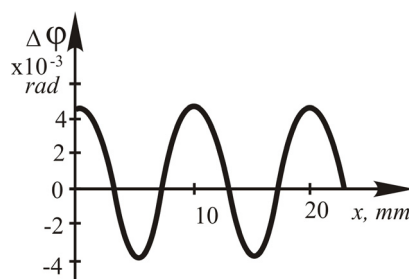


Рис. 5. Зависимость отклонения фазы входного напряжения при различном количестве зубцов линейки

Можно привести результаты исследования влияния и других факторов на погрешность ИИС. Для анализа погрешности ИИС предлагается использовать методику, суть которой изложена ниже.

Многомерное пространство и взаимодействие факторов

Как справедливо отмечено в работе [4], что система функций

$$\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}}, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos x, \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(2 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \cos(3 \cdot x), \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \sin(3 \cdot x), \dots,$$

представляет собой в явном виде полную ортонормированную систему.

Это обстоятельство позволяет утверждать, что при приближении функции тригонометрическим многочленом $s_n(x) = \frac{\alpha_0}{2} + \sum_{k=1}^n (\alpha_k \cdot \cos(k \cdot x) + \beta_k \cdot \sin(k \cdot x))$ среднеквадратичная погрешность $\delta^2 = \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) - s_n(x))^2 \cdot dx$ минимальна тогда и только тогда, когда в качестве α_k и β_k выбраны так называемые коэффициенты Фурье, определение которых согласно работе [6] имеет следующий вид:

$$\alpha_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \cos(kx)) \cdot dx,$$

$$\beta_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-\pi}^{\pi} (f(x) \cdot \sin(kx)) \cdot dx,$$

где $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Авторы предлагают использовать как базу приведенную выше ортонормированную систему для многомерного ортогонального пространства, где легче всего анализировать взаимодействие результатов однофакторных и многофакторных экспериментов. Основная идея заключается в том, что отклонения от линейной «идеализированной» характеристики ИИС предлагается разложить по всем осям многомерного ортогонального пространства [6].

Механизм взаимного влияния факторов легко устанавливается разложением однофакторных зависимостей по осям многомерного пространства [6].

Тогда координатами вектора отклонения от действия фактора b являются коэффициенты Фурье: $\Delta\phi_b(A_0^b, B_{1m}^b, C_{1m}^b, B_{2m}^b, C_{2m}^b, B_{3m}^b, C_{3m}^b, B_{4m}^b, C_{4m}^b, \dots)$.

Дисперсия ошибки угла от действия фактора b определяется следующим уравнением:

$$D_a = (A_0^b)^2 + (B_1^b)^2 + (C_1^b)^2 + (B_2^b)^2 + (C_2^b)^2 + (B_3^b)^2 + \dots$$

где $B_1^b = B_{1m}^b / \sqrt{2}$, $C_1^b = C_{1m}^b / \sqrt{2}$, $B_2^b = B_{2m}^b / \sqrt{2}$, $C_2^b = C_{2m}^b / \sqrt{2}$ и т. д.

Рассмотрим подробнее случай влияния факторов на погрешность ИИС.

Погрешность ИИС определяется воздействием n влияющих факторов [7].

Дисперсия результирующего отклонения от действия первого фактора определяется формулой

$$D_1 = A_1^2 = A_{01}^2 + B_{11}^2 + C_{11}^2 + B_{21}^2 + C_{21}^2 + B_{31}^2 + C_{31}^2 + \dots + B_{r1}^2 + C_{r1}^2.$$

Веса координат векторов влияющих факторов определяются уравнениями [7]

$$v_{01} = q_{01}^2 = \frac{A_{01}^2}{A_1^2}; \quad v_{B11} = q_{B11}^2 = \frac{B_{11}^2}{A_1^2}; \quad v_{C11} = q_{C11}^2 = \frac{C_{11}^2}{A_1^2};$$

$$v_{B21} = q_{B21}^2 = \frac{B_{21}^2}{A_1^2}; \quad v_{C21} = q_{C21}^2 = \frac{C_{21}^2}{A_1^2}.$$

Таким образом, уравнение дисперсии от действия первого фактора примет следующий вид [7]:

$$D_1 = A_1^2 (v_{01} + v_{B11} + v_{C11} + v_{B21} + v_{C21} + \dots + v_{Br1} + v_{Cr1}).$$

Очевидно соотношение

$$v_{01} + v_{B11} + v_{C11} + v_{B21} + v_{C21} + \dots + v_{Br1} + v_{Cr1} = 1.$$

Аналогичные соотношения справедливы для всех других факторов. Модель погрешности можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} D = & A_1^2 + K_{12} A_1 A_2 + K_{13} A_1 A_3 + K_{14} A_1 A_4 + \dots + K_{1n} A_1 A_n + \\ & + A_2^2 + K_{12} A_1 A_2 + K_{23} A_2 A_3 + K_{24} A_2 A_4 + \dots + K_{2n} A_2 A_n + \dots + \\ & + A_n^2 + K_{1n} A_1 A_n + K_{2n} A_2 A_n + \dots + K_{(n-1)n} A_{(n-1)} A_n, \end{aligned}$$

где D – результирующая дисперсия при одновременном действии всех n факторов; $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ – стандартные отклонения однофакторных экспериментов; $K_{12}, K_{13}, \dots, K_{23}, K_{24}, \dots, K_{34}, K_{35}, \dots, K_{(n-1)n}$ – коэффициенты взаимного влияния факторов.

Коэффициенты взаимного влияния факторов выражаются через веса коэффициентов Фурье соответствующих факторов. Коэффициент взаимного влияния первого и второго фактора определяется следующим образом:

$$K_{12} = \sqrt{v_{01} \cdot v_{02}} + \sqrt{v_{B11} \cdot v_{B12}} + \sqrt{v_{C11} \cdot v_{C12}} + \sqrt{v_{B21} \cdot v_{B22}} + \sqrt{v_{C21} \cdot v_{C22}} + \dots$$

Для наглядности вычисления коэффициентов взаимного влияния рекомендуется составить таблицу весов коэффициентов Фурье по осям многомерного пространства. Практика исследований указывает на то, что для практических расчетов достаточно рассмотреть составляющие по 15...19 осям.

Определение допустимых отклонений параметров из условия равенства весов

Относительная погрешность в результате влияния первого фактора определяется отношением стандартного отклонения к диапазону изменения фазы при полном перемещении шунта. В дальнейшем буквами $D_1, D_2, D_3, \dots$ будем обозначать дисперсии отклонений факторов однофакторных экспериментов. Буквами $D_1^1, D_2^1, D_3^1, \dots$ обозначим дисперсии, определенные факторами с учетом их взаимного влияния.

Определим допустимые отклонения параметров, влияющих на погрешность датчика из условия равенства весов влияющих факторов [5].

Максимальное изменение фазы на входе фазометра равно 2π . Погрешность датчика, вызванная воздействием первого фактора p_1 , равна

$$p_1 = \frac{\sqrt{D_1}}{2\pi} = \frac{A_1}{2\pi} \cdot 4\pi^2 p_1^2 = D_1.$$

Результирующая относительная погрешность и дисперсия связаны следующим соотношением:

$$p = \frac{\sqrt{D}}{2\pi} = \frac{A}{2\pi} \cdot 4\pi^2 p^2 = D.$$

Суммарная дисперсия отклонений фазы при одновременном воздействии на датчик всех факторов равна сумме дисперсий:

$$D = D_1^1 + D_2^1 + D_3^1 + \dots + D_n^1,$$

где $D_1^1, D_2^1, D_3^1, \dots, D_n^1$ – дисперсии, обусловленные факторами с учетом их взаимного влияния.

Введем понятие веса фактора с учетом взаимного влияния факторов.

Под весом влияния первого фактора будем понимать отношение следующего вида:

$$V_1 = \frac{A_1^2 + K_{12}A_1A_2 + K_{13}A_1A_3 + \dots + K_{1l}A_1A_l}{D} = \frac{D_1^1}{D}.$$

Формулы расчета весов других факторов будут записаны в аналогичном виде.

Вычислим допустимые отклонения влияющих факторов из условия равенства весов, учитывающих их взаимное влияние.

Вес первого фактора в суммарной дисперсии определится отношением

$$\frac{D_1^1}{D} = \frac{4\pi^2 p_1^2}{4\pi^2 p^2} = \frac{p_1^2}{p^2}.$$

С другой стороны, сумма весов всех факторов равна единице

$$\frac{D_1^1}{D} + \frac{D_2^1}{D} + \frac{D_3^1}{D} + \dots + \frac{D_l^1}{D} = 1.$$

Равенство весов предполагает равенство дисперсий

$$D_1^1 = D_2^1 = D_3^1 = \dots = D_l^1.$$

Заменяя отношение дисперсий отношением квадратов погрешностей, получим уравнение

$$p_1^2 + p_2^2 + p_3^2 + p_4^2 + \dots + p_l^2 = p^2.$$

В случае равенства дисперсий получаем

$$p_1^2 = p_2^2 = p_3^2 = \dots = p_l^2 = \frac{p^2}{n}.$$

Составляющие погрешности $p_1, p_2, p_3, \dots, p_l$ являются функциями всех влияющих факторов. Стандартные отклонения, обусловленные влияющими факторами, находятся из системы уравнений

$$A_1^2 + K_{12}A_1A_2 + K_{13}A_1A_3 + \dots + K_{1l}A_1A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

$$K_{12}A_1A_2 + A_2^2 + K_{23}A_2A_3 + \dots + K_{2l}A_2A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

$$K_{13}A_1A_3 + K_{23}A_2A_3 + A_3^2 + \dots + K_{3l}A_3A_l = \frac{4(\pi p^1)^2}{n};$$

...

$$K_{1l}A_1A_l + K_{2l}A_2A_l + K_{3l}A_3A_l + \dots + A_l^2 = \frac{4(\pi p^1)^2}{n}.$$

Нелинейное уравнение порядка n решается с помощью средств вычислительной техники. При анализе погрешности фазового датчика линейных перемещений количество факторов равно $n = 12$.

Решением системы являются стандартные отклонения однофакторных воздействий. Стандартные отклонения однофакторных воздействий дают возможность определить пределы отклонений влияющих факторов.

Полученные относительные погрешности однофакторных воздействий позволяют получить коэффициенты для вычисления допустимых отклонений по каждому параметру.

Ниже приведен пример решения системы нелинейных уравнений для вычисления стандартных отклонений на основании равенства дисперсий в среде MathCAD:

$$m1(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := a^2 + ab + 0,699ah + 0,057ap + \\ + 0,797aq + 0,053al + 0,019ak - 0,0001;$$

$$m2(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := ab + b^2 + 0,023bc + bd + \\ + 0,091be + 0,023bp + 0,057al - 0,0001;$$

$$m3(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,023bc + c^2 + 0,022cd + \\ + 0,098ce + 0,051cp + 0,39ck - 0,00014;$$

$$m4(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := bd + 0,022cd + d^2 + \\ + 0,091de + 0,021dp + 0,056dl - 0,0001;$$

$$m5(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,091be + 0,998ce + \\ + 0,091de + e^2 + 0,052ep + 0,389ek - 0,0001;$$

$$m6(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := f^2 + 0,092fg - 0,0001;$$

$$m7(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := g^2 + 0,092gf + 0,079gl + \\ + 0,051gk - 0,0001;$$

$$m8(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := h^2 + 0,699ha + 0,125hp + \\ + 0,317hq + 0,11hl + 0,015hk - 0,0001;$$

$$m9(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := p^2 + 0,057pa + 0,023pb + \\ + 0,051pc + 0,021pd + 0,052pe + 0,125ph + 0,05pq + \\ + 0,655p1 + 0,204pk - 0,0001;$$

$$m10(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,797qa + 0,317qh + 0,05qp + q^2 + \\ + 0,053ql + 0,018qk - 0,0001;$$

$$m11(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := 0,053 \cdot 1 \cdot a + 0,057 \cdot 1 \cdot b + 0,056 \cdot l \cdot d + \\ + 0,079 \cdot l \cdot g + 0,11 \cdot l \cdot h + 0,655 \cdot l \cdot p + 0,053 \cdot l \cdot q + l^2 + 0,171 \cdot l \cdot k - 0,0001;$$

$$m12(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,l,k) := k^2 + 0,019ak + 0,39kc + 0,389ke + \\ + 0,051kg + 0,015kh + 0,204kp + 0,018kq + 0,171k \cdot l - 0,0001;$$

$$a := 0 \quad b := 0 \quad c := 0 \quad d := 0 \quad e := 0 \quad f := 0 \quad g := 0 \quad h := 0 \quad p := 0 \\ q := 0 \quad 1 := 0 \quad k := 0.$$

Given

$$m1(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m2(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m3(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m4(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m5(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m6(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m7(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m8(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m9(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m10(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$m11(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0 \quad m12(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k) = 0$$

$$v := \text{Find}(a,b,c,d,e,f,g,h,p,q,1,k).$$

В приведенных уравнениях переменные $a, b, c, d, \dots, l, k$ являются стандартными отклонениями однофакторных экспериментов.

В рассмотренной программе буквами $a...k$ обозначены стандартные отклонения выходного сигнала от действия следующих факторов:

$a = 4,641 \cdot 10^{-3}$ – отклонение амплитуд напряжений генератора;

$b = 5,404 \cdot 10^{-3}$ – влияние точности установки фазового сдвига напряжений на входе сумматора;

$c = 6,382 \cdot 10^{-3}$ – влияние дискретности количества зубцов;

$d = 7,227 \cdot 10^{-3}$ – влияние отклонения количества витков от расчетного значения;

$e = 6,048 \cdot 10^{-3}$ – допуск на границы пазов в относительных единицах;

$f = 9,587 \cdot 10^{-3}$ – изменение длины зазора при перемещении шунта;

$g = 9,163 \cdot 10^{-3}$ – влияние изменения равномерности зазора;

$h = 7,03 \cdot 10^{-3}$ – влияние неравенства сопротивлений нагрузки;

$p = 6,725 \cdot 10^{-3}$ – влияние нестабильности частоты;

$q = 7,184 \cdot 10^{-3}$ – влияние погрешности изготовления шунта;

$l = 6,649 \cdot 10^{-3}$ – влияние точности балансировки сопротивлений обмоток магнитопровода;

$k = 4,726 \cdot 10^{-3}$ – влияние свойств материала магнитопровода.

По полученным значениям стандартных отклонений с помощью коэффициентов взаимодействия определяются допустимые отклонения того или другого параметра. Коэффициент влияния точности фазового сдвига напряжений на входе сумматора, вычисленный с помощью имитационной модели, равен 2,24. В нашем случае стандартное отклонение этого фактора должно быть равным $b = 5,404 \cdot 10^{-3}$. Разделив это значение на коэффициент влияния 2,24, получаем $2,41 \cdot 10^{-3}$ радиан. Погрешность фазового сдвига в процентах от идеального значения в $\pi/2$ радиан составит 0,15 %.

Заключение

Исходя из выше сказанного, в ходе конструкторско-технологического проектирования ИИС на основе схем фазовращателей с бегущим магнитным полем представляется крайне важным создание и ее имитационной модели. Такая модель необходима для получения идеализированной характеристики системы. Разработанная на основе имитационного моделирования модель ИИС должна определять абсолютную погрешность в зависимости от измеряемого перемещения, одновременно учитывая множество факторов. При этом вес каждого отдельно взятого фактора определяет степень его влияния на результирующую погрешность. Из условия тождественности весового коэффициента с дополнительно введенным поправочным коэффициентом вычисляются допустимые отклонения конструктивных параметров от параметров, полученных численным решением [6]. Однако не вызывает сомнения, что это не оптимальное решение.

Следует отметить, что при определении допустимых отклонений ИИС наиболее оптимальный результат следует ожидать в случае использования предложенной выше методики разложения результатов однофакторных отклонений по осям многомерного пространства.

Библиографический список

1. Конюхов, Н. Е. Электромагнитные датчики механических величин / Н. Е. Конюхов, Ф. М. Медников, М. Л. Нечаевский. – Москва : Машиностроение, 1987. – 256 с.
2. Батоврин, А. А. Электромашинные фазовращатели / А. А. Батоврин. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1986. – 124 с.
3. Пат. 2272244, МПК G01B 7/00. Фазовый датчик линейных перемещений / Горячев В. Я., Волчихин В. И., Чепасов А. П. – Заявл. 30.06.2004 ; опубл. 20.03.06, Бюл. № 8 ; Приоритет 30.06.2004. – 8 с.
4. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.
5. Уайлд, Д. Оптимальное проектирование / Д. Уайлд. – Москва : Мир, 1981. – 153 с.

6. Горячев, В. Я. Погрешность информационно-измерительных систем с электромеханическими датчиками / В. Я. Горячев, С. В. Кисляков, Д. И. Нефедьев, Б. П. Сибринин // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. – 2019. – С. 186–189.
7. Горячев, В. Я. Спектральный метод анализа погрешности информационно-измерительной системы / В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев, О. В. Гаврина // Наукоедение. – 2014. – № 5 (24). – 43TVN514.

References

1. Konyukhov N. E., Mednikov F. M., Nechaevskiy M. L. *Elektromagnitnye datchiki mekhanicheskikh velichin* [Electromagnetic sensors of mechanical quantities]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 256 p. [In Russian]
2. Batovrin A. A. *Elektromashinnye fazovrashchateli* [Electric phase shifters]. Leningrad: Energoatomizdat, 1986, 124 p. [In Russian]
3. Pat. 2272244, MPK G01B 7/00. *Fazovyy datchik lineynykh peremeshcheniy* [Pat. 2272244, IPC G01B 7/00. Linear motion phase sensor]. Goryachev V. Ya., Volchikhin V. I., Chepasov A. P., appl. 30.06.2004; publ. 20.03.06, bull. no. 8; prioritet 30.06.2004, 8 p. [In Russian]
4. Bronshteyn I. N., Semendyaev K. A. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow: Nauka, 1986, 544 p. [In Russian]
5. Uayld D. *Optimal'noe proektirovanie* [Optimal design]. Moscow: Mir, 1981, 153 p. [In Russian]
6. Goryachev V. Ya., Kislyakov S. V., Nefed'ev D. I., Sibirin B. P. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy* [Information technologies in science and education. Problems and prospects]. 2019, pp. 186–189. [In Russian]
7. Goryachev V. Ya., Nefed'ev D. I., Gavrina O. V. *Naukovedenie* [Science of science]. 2014, no. 5 (24), 43TVN514. [In Russian]

Бростилова Татьяна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tat-krupkina@yandex.ru

Brostilova Tat'yana Yur'evna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Горячев Владимир Яковлевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gorvlad1@yandex.ru

Goryachev Vladimir Yakovlevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Нефедьев Дмитрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ndi200106@yandex.ru

Nefed'ev Dmitriy Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тихомирова Анна Алексеевна

старший преподаватель,
кафедра электроэнергетики и электротехники,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an.tihomirova2013@yandex.ru

Tikhomirova Anna Alekseevna

senior lecturer,
sub-department of power engineering
and electrical engineering,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Абдирашев Омирзак Коптилеуулы

магистр, старший преподаватель,
кафедра космической техники и технологий,
Евразийский национальный университет
имени Л. Н. Гумилева
(Казахстан, г. Нур-Султан, ул. Казымукана, 11)
E-mail: omeke_92@mail.ru

Abdirashev Omirzak Koptileuuly

master, senior lecturer,
sub-department of space technic and technology,
L. N. Gumilyov Eurasian National University
(11 Kazhymukana street, Nur-Sultan, Kazakhstan)

Образец цитирования:

Методика анализа систематической погрешности информационно-измерительной системы перемещений на основе датчика линейных перемещений для электроэнергетических систем / Т. Ю. Бро-стилова, В. Я. Горячев, Д. И. Нефедьев, А. А. Тихомирова, О. К. Абдирашев // Измерение. Монито-ринг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 21–33. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-3.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ

УДК 621.317.7

DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-4

Д. А. Бобылев, А. П. Боровских

**ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ, ТОЧНОСТЬ
И БЫСТРОДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНОГО И ЧАСТОТНОГО
МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ОБЪЕКТОВ СО СХЕМАМИ ЗАМЕЩЕНИЯ
В ВИДЕ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ**

D. A. Bobylev, L. P. Borovskikh

**NOISE IMMUNITY, ACCURACY AND SPEED OF PARAMETRIC
IDENTIFICATION OF OBJECTS WITH EQUIVALENT CIRCUITS
IN THE FORM OF A MULTIELEMENT TWO-PORT BY MEANS
OF PULSE AND FREQUENCY METHODS**

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Цель работы заключается в сравнении основных характеристик – помехоустойчивости, точности и быстродействия – импульсного и частотного методов параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения. **Материалы и методы.** Для анализа потенциальных возможностей рассматриваемых методов параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения применялись методы математического моделирования. Широко использовались опубликованные результаты исследований различных авторов как в области исследования параметрических методов спектрального анализа, так и в области применения преобразования Фурье к решению указанной задачи. Учитывалась возможность применения современных средств вычислительной техники для выполнения необходимых преобразований в цифровой форме. **Результаты.** Показаны достоинства и недостатки методов преобразования при решении задач параметрической идентификации объектов с многоэлементной схемой замещения. **Выводы.** Выполненный анализ позволяет рационально выбрать метод решения задач указанного класса и может быть полезным при выборе направлений дальнейшего совершенствования методов.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to compare the main characteristics – noise immunity, accuracy and speed – pulse and frequency methods. **Materials and methods.** Methods of mathematical modeling were used to analyze the potential of the considered methods of parametric identification of objects with a multielement equivalent circuit. The published results of researches of various authors, both in the field of research of parametric methods of the spectral analysis, and in the field of application of the Fourier transform to the solution of the specified problem were widely used. The possibility of using modern computer

technology to perform the necessary transformations in digital form was taken into account.

Results. The advantages and disadvantages of the transformation methods in solving the problems of parametric identification of objects with a multielement equivalent circuit are shown.

Conclusions. The analysis allows to choose the method of solving the problems of this class and can be useful in choosing the directions of further improvement of methods.

К л ю ч е в ы е с л о в а: частотный и импульсный методы, преобразование, параметр, многоэлементный двухполюсник, быстродействие, помехоустойчивость, точность.

K e y w o r d s: frequency and pulse methods, transformations, parameter, multielement two-pole, speed, noise immunity, accuracy.

Введение

Для преобразователей параметров объектов со схемой замещения в виде линейного многоэлементного двухполюсника, применяемых в системах мониторинга, управления и контроля, помехоустойчивость и быстродействие – наиболее важные характеристики. Изначально в силу сложности самой задачи инвариантного преобразования параметров многоэлементных двухполюсников (ПМД) на первый план всегда выдвигалась реализуемость метода и поиск оптимальных вариантов реализации в смысле минимизации инструментальных погрешностей [1], а вопросы помехоустойчивости были на втором плане.

Однако сегодня помехоустойчивость и быстродействие становятся главными критериями оценки методов преобразования. Это связано с тем, что применение вычислительных средств в измерительной технике и развитие средств цифровой обработки сигналов позволяют реализовать вычислительные алгоритмы, о применении которых в реальных измерительных преобразователях еще не так давно не могло быть и речи, и различные преобразования аналоговых величин все больше уступают место цифровым процедурам [2, 3].

Безусловно, создание широкой и подробной картины свойств и возможностей различных методов преобразования ПМД – задача довольно сложная, которая должна решаться поэтапно. В рамках статьи можно решить существенно более скромную задачу: провести сравнительный анализ определенной пары хорошо известных методов, дуальных по определенному признаку, а именно: импульсного и частотного методов.

Импульсный и частотный методы преобразования ПМД и два подхода к спектральному анализу

Универсальный подход к измерению параметров двухполюсника с известной схемой замещения заключается в получении некоторого числа скаляров – значений определенных функционалов иммитанса двухполюсника или его импульсной характеристики, по которым затем можно вычислить ПМД. Число скаляров при этом должно быть не меньше числа ПМД K , а функционалы должны быть линейно независимы [2].

Здесь следует выделить два в известной степени дуальных метода преобразования ПМД, которые условно можно определить как импульсный и частотный. В первом случае в качестве основной характеристики объекта исследования (ОИ) изначально рассматривается его импульсная характеристика, во втором случае – ее преобразование Фурье – иммитанс.

Импульсный метод, как правило, предполагает воспроизведение в виде сигнала переходной характеристики ОИ, представляющей собой сумму экспонент, и в качестве скаляров определение ее значений, взятых с некоторым равномерным шагом Δt .

Длительное время методы импульсной группы были мало востребованы. Для их эффективной реализации необходимы были вычислительные средства, а возможности аналоговых вычислений были невелики. В результате практическое значение могли иметь лишь отдельные решения, где простота вычислений, выполняемых в основном в аналоговом виде, обеспечивала относительную простоту реализации [1]. Об обеспечении помехоустойчивости, как правило, и речи не шло.

Все изменилось, когда средства вычислительной техники по-настоящему вошли в сферу техники измерительной. Импульсные методы теперь уже в практическом плане обрели свою вычислительно-алгоритмическую основу: параметрические методы спектрального анализа, прежде всего, метод Прони. Эти методы непосредственно ориентированы на определение параметров экспоненциальных составляющих сигнала, составляющих переходной характеристики.

Процедура Прони состоит из трех основных этапов [4–6]. Для конкретного случая, когда переходная характеристика ОИ представляет собой, например, сумму трех действительных экспонент, для идентификации их параметров достаточно шести эквидистантных отсчетов $v_1, \dots, v_6$.

На первом этапе решается система уравнений

$$\begin{bmatrix} v_3 & v_2 & v_1 \\ v_4 & v_3 & v_2 \\ v_5 & v_4 & v_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_2 \\ c_1 \\ c_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} v_4 \\ v_5 \\ v_6 \end{bmatrix} \quad (1)$$

относительно коэффициентов c_0, c_1, c_2 характеристического полинома [4]. Затем необходимо определить его корни z_1, z_2, z_3 , решив уравнение $z^3 + c_2 z^2 + c_1 z + c_0 = 0$.

Получив значения корней, можно вычислить по ним постоянные времени экспонент: $\tau_1 = -\Delta t / \ln z_1, \tau_2 = -\Delta t / \ln z_2, \tau_3 = -\Delta t / \ln z_3$.

Затем из системы линейных уравнений можно найти амплитуды экспонент U_1, U_2 и U_3 :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ z_1^2 & z_2^2 & z_3^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Частотный метод предполагает измерение значений иммитанса $X(\omega)$ в некоторых точках частотного диапазона $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$. В качестве тестового сигнала здесь используется суперпозиция гармонических сигналов, реализованная последовательно или параллельно во времени.

В качестве скаляров выступают значения α_i и β_i составляющих иммитанса $X(\omega_i) = \alpha_i + j\beta_i$ на частотах ω_i тестового сигнала. Для определения ПМД был предложен достаточно простой алгоритм расчета коэффициентов дробно-рациональной функции, описывающей иммитанс ОИ. Метод сводится к решению системы K линейных уравнений [2]. Для рассматриваемого случая, когда импульсная характеристика ОИ состоит из суммы трех действительных экспонент, система имеет вид

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega_1^2 & 0 & \beta_1 \omega_1 & \alpha_1 \omega_1^2 & -\beta_1 \omega_1^3 \\ \omega_1 & 0 & -\omega_1^3 & -\alpha_1 \omega_1 & \beta_1 \omega_1^2 & \alpha_1 \omega_1^3 \\ 0 & -\omega_2^2 & 0 & \beta_2 \omega_2 & \alpha_2 \omega_2^2 & -\beta_2 \omega_2^3 \\ \omega_2 & 0 & -\omega_2^3 & -\alpha_2 \omega_2 & \beta_2 \omega_2^2 & \alpha_2 \omega_2^3 \\ 0 & -\omega_3^2 & 0 & \beta_3 \omega_3 & \alpha_3 \omega_3^2 & -\beta_3 \omega_3^3 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_3^3 & -\alpha_3 \omega_3 & \beta_3 \omega_3^2 & \alpha_3 \omega_3^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \alpha_3 \\ \beta_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где c_i – коэффициенты дробно-рациональной функции иммитанса.

Сегодня измерение значений иммитанса в нескольких точках частотного диапазона не составляет большой проблемы [2]. Воздействуя на ОИ полигармоническим тестовым сигналом, нетрудно определить действительную и мнимую составляющие тока и напряжения на каждой частоте ω_i : $\text{Re} \dot{I}_i, \text{Im} \dot{I}_i, \text{Re} \dot{U}_i, \text{Im} \dot{U}_i$ посредством фазочувствительного преобразования (ФЧП). И на основании полученных данных можно вычислить значения иммитанса

$$X(\omega_i) = \left[\frac{\text{Re} \dot{U}_i + j \text{Im} \dot{U}_i}{\text{Re} \dot{I}_i + j \text{Im} \dot{I}_i} \right]^{\pm 1}.$$

В данном случае ФЧП фактически представляет собой классический Фурье-анализ в указанных точках частотного диапазона, т.е. скалярное произведение дискретизированного тока, протекающего через ОИ, или напряжения на нем, и ортов $g_{i_{\text{Re}}}(t)$ и $g_{i_{\text{Im}}}(t)$ длительности T , образующих ортогональную систему координат для синусоидальных сигналов с частотой ω_i [2].

По сложности реализации рассматриваемые методы различаются не столь уж существенно, поскольку средства вычислительной техники и цифровой обработки сигналов необходимы в обоих случаях.

Однако уже здесь важно отметить следующее различие методов. Частотный метод позволяет заменить отклик ОИ, переходная характеристика которого представляет собой сумму в общем случае комплексных экспонент с неизвестными амплитудами, а, главное, с неизвестными постоянными времени и частотами, суммой комплексных незатухающих экспонент с известными частотами, но с неизвестными амплитудами. Более того, спектральные составляющие отклика при этом оказываются полностью когерентны всем тем сигналам, которые необходимы для их полноценного исследования, ибо и тестовый сигнал и вспомогательные сигналы формируются из одного и того же источника. Таким образом, временные параметры исследуемых сигналов (тока, протекающего через ОИ, и напряжения на нем) оказываются существенным образом определенными, хотя это и достигается благодаря применению более сложного, нежели единичный скачок, тестового воздействия. Это значительно упрощает задачу идентификации составляющих сигналов, несущих информацию о параметрах ОИ.

Таким образом, рассматриваемым дуальным методам преобразования ПМД органично соответствуют и два дуальных метода спектрального анализа, что во многом определяет возможности методов.

Важной характеристикой любого метода преобразования ПМД является степень влияния погрешностей скаляров на точность определения параметров экспонент импульсной характеристики (параметров простых дробей иммитанса) или коэффициентов дробно-рациональной функции иммитанса. Чем сильнее это влияние, тем слабее помехоустойчивость метода при прочих равных условиях.

Эти свойства для импульсного и частотного методов были исследованы посредством математического моделирования для самого простого случая, когда информационная избыточность, необходимая для обеспечения помехоустойчивости, отсутствует.

На рис. 1,а представлены графики зависимости погрешности определения постоянных времени трех действительных экспонент с единичными амплитудами от шага дискретизации Δt по шести эквидистантным отсчетам. При этом был выбран случай знакопередающей аддитивной погрешности отсчетов (наихудший случай), которая по абсолютной величине была принята равной 0,001 % от амплитуды экспоненты. Постоянные времени экспонент соотносились как $\tau_3 = 2\tau_2 = 4\tau_1$.

А на рис. 1,б представлены графики зависимости погрешности определения постоянных времени тех же экспонент импульсной характеристики частотным методом от частоты самой низкочастотной гармоники. При этом частоты верхних гармоник выбирались из условия: $f_2 = 1/(2\pi\tau_2)$, $f_3 = 1/(2\pi\tau_3)$, а нижняя частота f_1 варьировалась возле значения $f_0 = 1/(2\pi\tau_1)$. Относительные погрешности скаляров $\text{Re}[X(\omega_1)]$, $\text{Im}[X(\omega_1)]$, $\text{Re}[X(\omega_2)]$, $\text{Im}[X(\omega_2)]$, $\text{Re}[X(\omega_3)]$, $\text{Im}[X(\omega_3)]$ также взяты знакопеременными и по абсолютной величине равными 0,001 %.

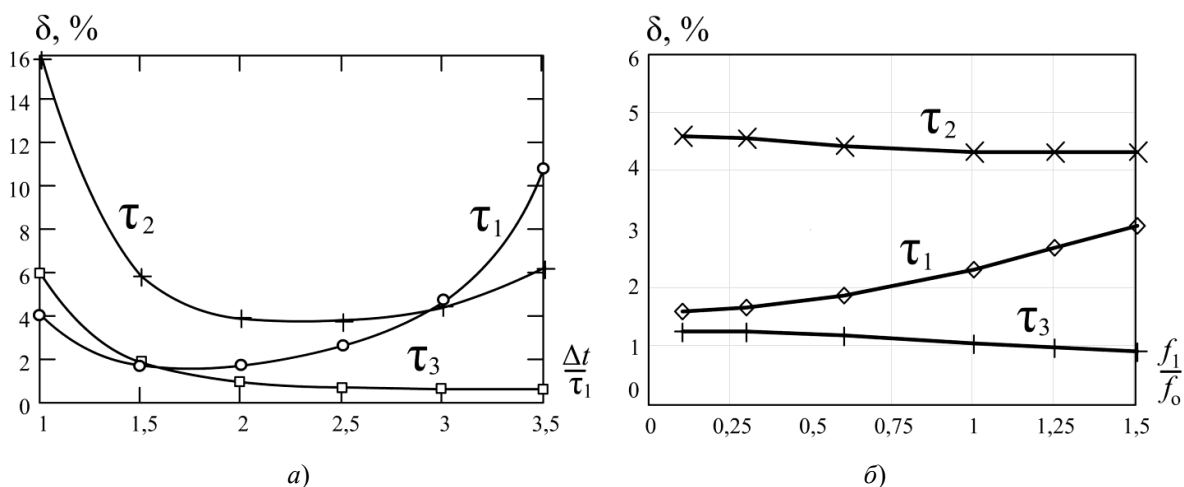


Рис. 1. Зависимости погрешности определения постоянных времени экспоненциальных составляющих импульсной характеристики двухполюсника по методу Прони (а) и частотным методом (б)

Приведенные графики отражают, прежде всего, высокую уязвимость точности методов преобразования ПМД от погрешностей получения скаляров, когда даже небольшие погрешности в данных могут значительно снижать точность преобразования. Это означает, что в простейшем своем варианте без дополнительных мер обеспечения помехоустойчивости такие методы практически не применимы.

Быстродействие

Быстродействие преобразователя ПМД определяется двумя факторами. Первый из них – это длительность $T_{ИХ}$ импульсной характеристики ОИ, а другой фактор – это время, необходимое для обеспечения помехоустойчивости.

Теоретически метод Прони позволяет идентифицировать параметры суммы экспоненциальных сигналов за время, существенно меньшее длительности $T_{ИХ}$ импульсной характеристики. Однако на практике это время должно быть соизмеримо с ее длительностью, равной $12\text{--}14 \tau_n$, где τ_n – постоянная времени самой медленной экспоненты импульсной характеристики ОИ, поскольку при уменьшении шага дискретизации Δt погрешности преобразования параметров экспонент резко возрастают, что хорошо видно на графиках (см. рис. 1,а).

Регистрация значений сигнала практически на всем протяжении ИХ – необходимое условие точного, помехоустойчивого преобразования ПМД. Попытка определить ПМД на интервале существенно меньшем ведет, как правило, к непропорциональному снижению точности преобразования.

К тому же необходимо учесть, что в системах мониторинга, управления и контроля быстродействие преобразователя ПМД характеризуется не временем, необходимым для получения одиночного измерения, а периодом повторения измерительных циклов, минимально возможным периодом обновления результатов измерения. Поэтому для импульсного метода тестовый сигнал будет иметь вид периодического импульсного сигнала с периодом $2T_{ИХ}$. «Отрицательный» его полупериод необходим для восстановления ОИ в исходное состояние.

При этом переходный процесс измерительной цепи по отрицательному перепаду тестового сигнала также необходимо использовать для получения информации. Исследование положительного и отрицательного откликов измерительной цепи дает дополнительные возможности для повышения помехозащищенности преобразования, позволяя простыми средствами устранить постоянную составляющую помехи и снизить влияние низкочастотных помех.

Если для определения ПМД используют информацию об отклике как на положительный, так и отрицательный перепад тестового сигнала, то интервал наблюдения будет составлять $2T_{ИХ}$, а минимально возможный период повторения циклов преобразования – $T_{ИХ}$ (рис. 2,а).

Что касается частотного метода, то первоначальное несовершенство средств измерения иммитанса, обладавших низким быстродействием, наложило свой отпечаток и на представление о быстродействии самого метода. На самом деле время, минимально необходимое для реализации частотного метода, также в целом определяется длительностью импульсной характеристики ОИ.

Время преобразования определяется здесь частотой (точнее, периодом) первой гармоники тестового сигнала. Результаты математического моделирования (см. рис. 1,б) показывают, что чем ниже частота f_1 тестового сигнала, тем меньше погрешность преобразования. Однако, если эта частота лежит в диапазоне от 0 до $f_1 = 1/(2\pi\tau_n)$, погрешность изменяется незначительно. Резкий рост погрешности начинается тогда, когда значение частоты первой гармоники начинает превышать значение $1/(2\pi\tau_n)$.

Таким образом, близким к оптимальному, в смысле компромисса между быстродействием и точностью, значением частоты первой гармоники тестового сигнала можно считать значение $1/(2\pi\tau_n)$ [7].

В результате при оценке быстродействия частотного метода период полигармонического тестового сигнала можно принять равным $6\tau_n$. В установившемся режиме при кратности частот полигармонического тестового сигнала частоте его низкочастотной гармоники для определения действительных и мнимых составляющих отклика на всех частотах достаточно одного периода тестового сигнала.

Тем не менее в общем случае необходимо учесть возможное наличие переходного процесса длительности $T_{ИХ}$ в начале процесса мониторинга или при резком изменении параметров

ОИ. В работе [8] показано, что, применяя специальные весовые функции, за время равное 3–4 периодам тестового сигнала можно обеспечить практическую инвариантность результата ФЧП к действительным экспонентам с любыми постоянными времени. Таким образом, время преобразования в целом не превысит $(18–24)\tau_n$. При этом характер амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) ФЧП будет соответствовать характеру АЧХ полосового фильтра [8].

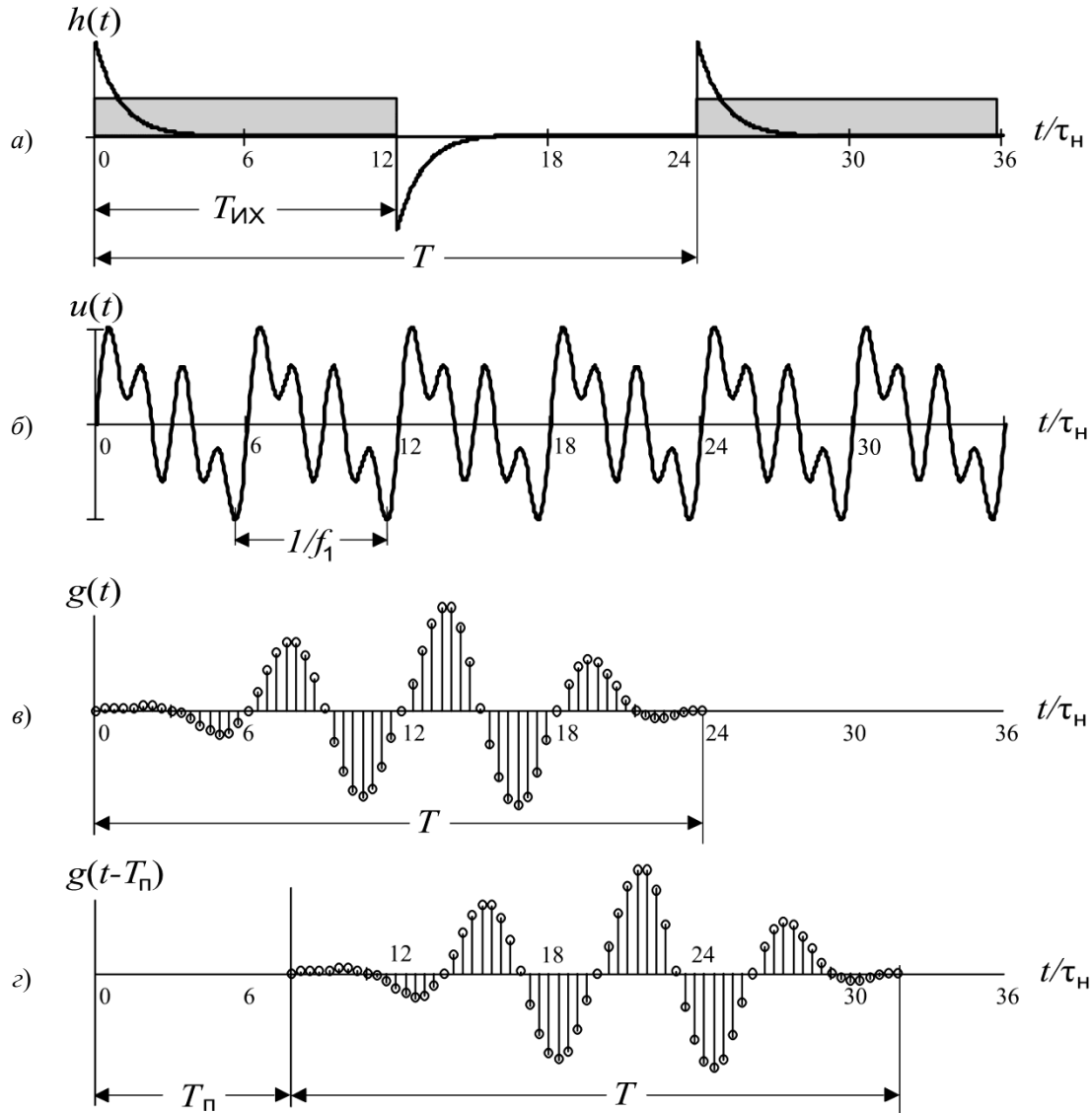


Рис. 2. Импульсное тестовое воздействие и переходная характеристика ОИ (а); полигармоническое напряжение на ОИ (б); опорный сигнал (в); опорный сигнал следующего цикла преобразования (г)

Отметим, что параметры переходного процесса во многом будут определяться параметрами самого ОИ, что облегчает подавление паразитной экспоненциальной составляющей отклика [9].

Здесь предполагается, что процедура дискретизации тока, протекающего через ОИ, и напряжения на нем осуществляется параллельно двумя дискретизирующими устройствами или одним дискретизирующим устройством – квазипараллельно. В этом случае период T_n повторения циклов преобразования может быть и существенно меньше, нежели длительность интервала наблюдения T .

Принципиальная возможность обновления результатов преобразования с периодом менее длительности ИХ объекта выгодно отличает частотный метод преобразования от импульсного, однако в этом случае результаты соседних циклов будут коррелированы тем больше, чем меньше отношение T_n/T .

Тем не менее в целом с точки зрения быстродействия рассматриваемые методы представляются равноценными.

Помехоподавление

Результаты многочисленных подробных исследований возможностей метода Прони, например [4–6], а также возможностей линейных преобразований, например, [4, 8, 9] позволяют выполнить краткий сопоставительный анализ помехоустойчивости рассматриваемых методов преобразования ПМД.

На основании изложенного выше можно ориентировочно определить минимальное значение времени преобразования, уменьшение которого влечет за собой непропорциональное снижение точности и создает большие проблемы с обеспечением помехоустойчивости. Это значение составляет примерно $2T_{\text{ИХ}}$, причем для обоих методов.

Можно выделить три основных вида актуальных помех:

- случайные помехи (шум квантования, шумы электронных компонентов);
- периодические помехи, например, сетевая;
- различные сложные тренды.

Частотный метод позволяет обеспечить подавление помех на стадии ФЧП, которое эквивалентно линейной цифровой фильтрации. Составляющие комплексных сигналов на разных частотах определяются как взвешенные суммы отсчетов. Формируя определенным образом весовую функцию, представляющую собой фактически импульсную характеристику ФЧП, можно относительно простыми средствами добиваться самых разнообразных селективных эффектов. При этом процедура определения параметров дробно-рациональной функции иммитанса, требующая решения системы линейных уравнений, остается неизменной. Ее порядок определяется только числом ПМД, а вся тяжесть достижения необходимой избирательности ложится на простую в реализации линейную процедуру взвешенного суммирования.

Существенно сложнее обстоит дело при реализации импульсного метода. Здесь в общем случае практически все помехи должны быть учтены в модели метода Прони. Чем выше требования к помехоустойчивости, тем сильнее будет «разбухать» нелинейная процедура Прони. Например, сетевая помеха представляет собой широкополосный периодический сигнал (необходимо учитывать полтора-два десятка гармоник). Это уже существенным образом усложняет модель.

При этом необходимо учитывать девиацию частоты и амплитуды помехи, приводящие к размыванию ее спектра. В связи с этим возникают дополнительные трудности, в то время как применение преобразования Фурье в рамках частотного метода позволяет реализовать ФЧП с АЧХ, эквивалентной АЧХ полосового фильтра, и девиация параметров сетевой помехи здесь не создает особых проблем.

Наличие в сигнале сложного по форме паразитного тренда также приводит к определенным трудностям при реализации импульсного метода – тренд нужно представить в экспоненциальном виде. В то время как инвариантность ФЧП к помехе, представимой полиномом определенной степени, легко достигается посредством несложной модификации весовой функции.

Для минимизации влияния случайных помех и, прежде всего, шума квантования необходима информационная избыточность. При реализации импульсного метода использование этой избыточности должно быть «зашиито» в процедуру Прони. Для этого на первом и третьем этапах алгоритма оптимизируют решения систем уравнений по методу наименьших квадратов, используя указанную информационную избыточность. Однако возможности подавления случайной помехи здесь ограничены [6], в то время как линейные преобразования позволяют подавить случайные помехи пропорционально $\sqrt{N}$, где N – число отсчетов, используемых при реализации ФЧП, которое ограничено только возможностями применяемых аппаратных средств.

Необходимо указать еще на одно качественное различие двух методов спектрального анализа применительно к задаче преобразования ПМД.

Параметрические методы спектрального анализа требуют определения параметров всех составляющих сигнала, из которых в рассматриваемом нами случае информативной является только их малая часть.

В то время как посредством ФЧП необходимо определить лишь комплексные амплитуды нескольких гармоник с известной и стабильной частотой. Все остальные многочисленные составляющие отклика рассматриваются как паразитные, подлежащие подавлению. Это существенно более простая задача.

Заключение

Основные достоинства рассматриваемых методов преобразования ПМД жестко связаны со свойствами применяемых методов спектрального анализа. Метод Прони представляет собой альтернативу классическому спектральному анализу, основанному на преобразовании Фурье, ибо он позволяет преодолеть те ограничения, которые заложены в последнем. Именно поэтому преимущества метода Прони при решении многих задач неоспоримы, несмотря на отсутствие у него важных достоинств преобразования Фурье.

Однако необходимое при реализации частотного метода измерение иммитанса на нескольких частотах – это задача, при современной реализации которой по-настоящему не проявляется ни один из недостатков преобразования Фурье. Зато все его достоинства выявляются в полной мере. Частоты гармоник тестового сигнала известны и стабильны. Их периоды кратны периоду самой низкочастотной гармоники. Период полигармонического тестового сигнала кратен интервалу наблюдения. И дискретизирующие последовательности когерентны тестовому сигналу.

Что же касается импульсного метода, то здесь наряду с достоинствами метода Прони проявляются и его недостатки. Перспективы применения импульсного метода связаны, прежде всего, с совершенствованием вычислительных алгоритмов и развитием вычислительных средств.

Библиографический список

1. Кнеллер, В. Ю. Определение параметров многоэлементных двухполюсников / В. Ю. Кнеллер, Л. П. Боровских. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 144 с.
2. Бобылев, Д. А. Универсальный преобразователь параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Датчики и системы. – 2013. – № 12. – С. 7–12.
3. Мелентьев, В. С. Аппроксимационные методы и средства измерения и контроля параметров двухполюсных электрических цепей / В. С. Мелентьев, В. И. Батищев. – Москва : Физматлит, 2012. – 198 с.
4. Марпл-мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С. Л. Марпл-мл. – Москва : Мир, 1990. – 265 с.
5. Кузнецов, С. А. Выбор методов спектрального оценивания для систем контроля динамических характеристик датчиков давления / С. А. Кузнецов, М. Г. Мясникова, А. П. Панов, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 45–51.
6. Цыпин, Б. В. Применение метода спектрального оценивания Прони для измерения параметров цепей переменного тока / Б. В. Цыпин // Датчики и системы. – 2003. – № 1. – С. 20–24.
7. Бобылев, Д. А. Оценка быстродействия помехозащищенных преобразователей параметров многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2015. – № 12. – С. 3–8.
8. Бобылев, Д. А. Фазочувствительные преобразования сигналов, обеспечивающие высокое подавление экспоненциальных помех / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2011. – № 2. – С. 2–8.
9. Бобылев, Д. А. Применение адаптивной весовой функции для определения составляющих периодического сигнала на фоне экспоненциальной помехи / Д. А. Бобылев // Датчики и системы. – 2016. – № 12. – С. 16–21.

References

1. Kneller V. Yu., Borovskikh L. P. *Opredelenie parametrov mnogoelementnykh dvukhpolyusnikov* [Determining the parameters of multi-element two-poles]. Moscow: Energoatomizdat, 1986, 144 p. [In Russian]
2. Bobylev D. A., Borovskikh L. P. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2013, no. 12, pp. 7–12. [In Russian]
3. Melent'ev V. S., Batishchev V. I. *Approksimatsionnye metody i sredstva izmereniya i kontrolya parametrov dvukhpolyusnykh elektricheskikh tsepey* [Approximation methods and tools for measuring and controlling parameters of two-pole electric circuits]. Moscow: Fizmatlit, 2012, 198 p. [In Russian]
4. Marpl-ml. S. L. *Tsifrovoy spektral'nyy analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow: Mir, 1990, 265 p. [In Russian]

5. Kuznetsov S. A., Myasnikova M. G., Panov A. P., Tsypin B. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2015, no. 2 (12), pp. 45–51. [In Russian]
6. Tsypin B. V. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2003, no. 1, pp. 20–24 [In Russian]
7. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2015, no. 12, pp. 3–8. [In Russian]
8. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2011, no. 2, pp. 2–8. [In Russian]
9. Bobylev D. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2016, no. 12, pp. 16–21. [In Russian]

Бобылев Дмитрий Алексеевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: dabobyl@ipu.ru

Bobylev Dmitry Alekseevich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Боровских Леонид Петрович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: borovski@ipu.ru

Borovskikh Leonid Petrovich

candidate of technical sciences,
senior researcher,
V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS
(65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Образец цитирования:

Бобылев, Д. А. Помехоустойчивость, точность и быстродействие импульсного и частотного методов параметрической идентификации объектов со схемами замещения в виде многоэлементных двухполюсников / Д. А. Бобылев, Л. П. Боровских // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 34–42. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-4.

В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Карпов, А. П. Юнин

ВОЗМОЖНОСТИ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ВЫЧИСЛЕНИЙ ЭНТРОПИИ ДЛИННЫХ ОСМЫСЛЕННЫХ ПАРОЛЕЙ В ПРОСТРАНСТВЕ СВЕРТОК ХЭММИНГА

V. I. Volchikhin, A. I. Ivanov, A. P. Karpov, A. P. Yunin

POSSIBILITIES IF REGULARIZING THE ENTROPY CALCULATIONS OF LONG MEANINGFUL PASSWORDS IN HAMMING CONVOLUTIONS SPACE

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование возможностей регуляризации вычисления энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами, являющимися осмысленными легко запоминаемыми паролями на родном языке пользователя. **Материалы и методы.** Используется пространство сверток Хэмминга кодовой последовательности парольной фразы длиной в 256 бит с эталонной кодовой последовательностью длиной 32 000 бит. Статистическими методами исследуются различные методы повышения точности вычисления энтропии длинных осмысленных паролей в пространстве сверток Хэмминга. **Результаты.** Показано, что стандартное отклонение распределения значений расстояний Хэмминга падает при отказе от стандартной кодировки ASCII парольной фразы и эталонной последовательности и переходе к кодировкам с определенными свойствами. Предложено использовать кодировку без разрывов между кодируемыми символами, упорядоченную по частоте встречи символа в тексте на родном языке пользователя. **Выводы.** В пространстве сверток Хэмминга за счет перехода к оптимальной кодировке символов парольной фразы и эталонного текста возможно снижение требований к длине эталонного текста.

A b s t r a c t. Background. The aim of the work is to study the possibilities of regularizing the calculation of the long codes entropy with dependent digits, which are meaningful easily remembered passwords in the user's native language. **Materials and methods.** The Hamming convolutions space is used for a code sequence of a passphrase of 256 bits with a reference code sequence of 32 000 bits in length. Statistical methods are used to investigate various methods for increasing the accuracy of the calculation of the long meaningful passwords entropy in the Hamming convolutions space. **Results.** It is shown that the standard deviation of the distribution of Hamming distances falls when the standard ASCII coding of the passphrase and the reference sequence is abandoned, and the transition to codings with certain properties. It is proposed to use the encoding without gaps between the characters being encoded, ordered by the frequency of the character's encounter in the text in the user's native language. **Conclusions.** In the Hamming convolutions space, due to the transition to the optimal encoding of the characters of the passphrase and the reference text, the requirements for the length of the reference text can be reduced.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энтропия длинных кодов с зависимыми разрядами, регуляризация вычислений, многообразие сверток Хэмминга, требования к перекодировке данных перед их свертыванием по Хэммингу.

Key words: entropy of long codes with dependent digits, regularization of computations, Hamming convolutions variety, requirements for recoding data before Hamming convolutions calculation.

Проблема вычисления энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами

В настоящее время безопасность информационных ресурсов является одной из наиболее актуальных задач сетевой инфраструктуры любой организации. При этом одним из основных методов обеспечения информационной безопасности ресурсов является использование систем разграничения доступа. В данных системах применяют различные методы аутентификации, наиболее популярным из которых является метод, основанный на знании секретной информации, примером которого является парольная защита.

Однако применение данного метода, как правило, является компромиссным – наиболее предпочтительным с точки зрения информационной безопасности является использование паролей, сформированных из случайных (псевдослучайных) символов. В то время как для конечного пользователя системы разграничения доступа запоминание и использование таких паролей неприемлемо.

Одним из возможных решений данного компромисса является использование пользователем длинных осмысленных парольных фраз – легких для запоминания, но трудных для брутфорса. Согласно обновленным рекомендациям Национального института стандартов и технологий, данное решение является наиболее предпочтительным при разработке и эксплуатации систем аутентификации [1].

Для таких систем существует задача оценки стойкости легко запоминаемых, осмысленных парольных фраз. С этой задачей легко можно справиться, оценив энтропию парольной фразы по Шеннону:

$$H("x_1, x_2, \dots, x_{256}") = - \sum_{i=1}^{256} P_i \cdot \log_2(P_i), \quad (1)$$

где P_i – вероятность появления одного из 2^{256} состояний кода, тестируемой парольной фразы.

Однако данное вычисление является задачей высокой вычислительной сложности. Для реализации вычислений по формуле (1) необходимо определять вероятности появления очень редких событий. Таким образом, оценка энтропии длинных паролей по Шеннону на обычной вычислительной машине оказывается технически не выполнима даже для паролей, состоящих из восьми букв (64 бита).

Проблема оценки энтропии длинных кодов может быть решена, если придерживаться рекомендаций ГОСТ Р 52633.3 [2]. Национальный стандарт рекомендует перейти от обычного представления кодов к вычислению расстояний Хэмминга по модулю два:

$$h_2 = 256 - \sum_{i=1}^{256} ("x_i") \oplus ("T_i"), \quad (2)$$

где $\oplus$ – операция сложения по модулю два; $"x_i"$ – разряды тестируемой последовательности; $"T_i"$ – разряды тестовой последовательности, например, осмысленных фраз русского языка в 8-битной ASCII кодировке или случайных состояний, полученных от 256-мерного генератора «белого» шума.

При этом оценка энтропии пароля строится на предсказании редких событий (ожидаемые редкие события по Шеннону замещаются на предсказание вероятности редких событий в пространстве расстояний Хэмминга). В свою очередь, возможность предсказаний опирается на факт нормального распределения расстояний Хэмминга для кодов с длиной более 32 бит (паролей из четырех букв в 8-битной ASCII кодировке). Это позволяет, в частности, оценивать энтропию сильно коррелированных откликов нейронной сети на биометрические образы [3–5].

При условии, что объем тестовой выборки должен примерно на порядок быть больше, чем обратная величина экспериментально оцениваемой вероятности, для оценки расстояния 256-битной последовательности к эталонному тексту по Шеннону (1) требуется 2^{256+4} случай-

ных кодов, в то время как при переходе в пространство расстояний Хэмминга для вычисления математического ожидания – $E(h)$ и стандартного отклонения – $\sigma(h)$ достаточно выборки в сто опытов ($100 \approx 2^7$). Таким образом, сокращение объемов тестовой выборки при вычислении энтропии в рассматриваемом случае может достигать величины – 2^{253} .

В работе [6] показано, что более реалистичные оценки распределения расстояний Хэмминга можно получить, приняв в расчет 8-битную кодировку символов и используя в качестве эталонного текста текст на том же языке, что и тестируемая парольная фраза. Учет 8-битной структуры кодов ASCII приводит к необходимости вычислять свертки Хэмминга по модулю восемь:

$$h_8 = 256 \cdot 32 - \sum_{i=1}^{32} ("c_i, c_{i+1}, \dots, c_{i+8} ") \oplus_8 ("x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+8} "). \quad (3)$$

На рис. 1 приведено распределение расстояний Хэмминга между 32-символьной парольной фразой (256 бит) и тестовым текстом на русском языке длиной в 32 000 символов в кодировке ASCII.

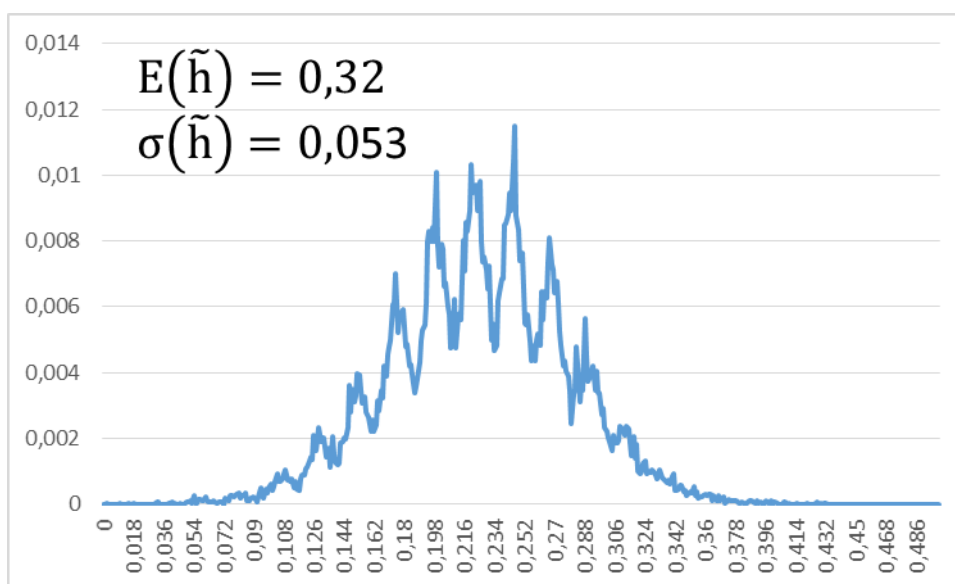


Рис. 1. Распределение расстояний Хэмминга в 8-битной системе счисления со свертыванием данных по модулю 8 в кодировке ASCII

Возможные методы регуляризации вычислений энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами

Кодировка ASCII имеет компактное расположение кодов букв латиницы и кодов букв кириллицы. При этом в случае, если оценивать парольные фразы со знаками препинания на русском языке, можно наблюдать дефект вычислений, связанный с существенным расстоянием между группами кодов знаков препинания и кодов букв кириллицы.

Поскольку на величину стандартного отклонения распределения расстояний Хэмминга прежде всего влияет компактность кодировки групп символов (отсутствие разрывов между кодами), процедуры вычисления свертки Хэмминга можно сделать более устойчивыми за счет перекодировок, которые ликвидируют пробелы между кодами группы «кириллица» и знаков препинания для текстов на русском. Один из возможных примеров данного метода регуляризации вычисления энтропии является кодировка, приведенная в табл. 1.

На рис. 2 сопоставлены усредненные результаты вычисления распределения расстояний Хэмминга для 10 осмысленных паролей на русском языке, длиной 256 бит с эталонным текстом длиной 32 000 символов, в кодировке ASCII и кодировке без разрывов между группами символов в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Таблица перекодировки групп символов «кириллица»
и знаков препинания для текстов на русском языке

Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа
,	0	К	18	Ь	36	о	54
...	1	Л	19	Э	37	п	55
«	2	М	20	Ю	38	р	56
:	3	Н	21	Я	39	с	57
	4	О	22	а	40	т	58
-	5	П	23	б	41	у	59
.	6	Р	24	в	42	ф	60
е	7	С	25	г	43	х	61
А	8	Т	26	д	44	ц	62
Б	9	У	27	е	45	ч	63
В	10	Ф	28	ж	46	ш	64
Г	11	Х	29	з	47	щ	65
Д	12	Ц	30	и	48	ъ	66
Е	13	Ч	31	й	49	ы	67
Ж	14	Ш	32	к	50	ь	68
З	15	Щ	33	л	51	э	69
И	16	Ъ	34	м	52	ю	70
Й	17	Ы	35	н	53	я	71

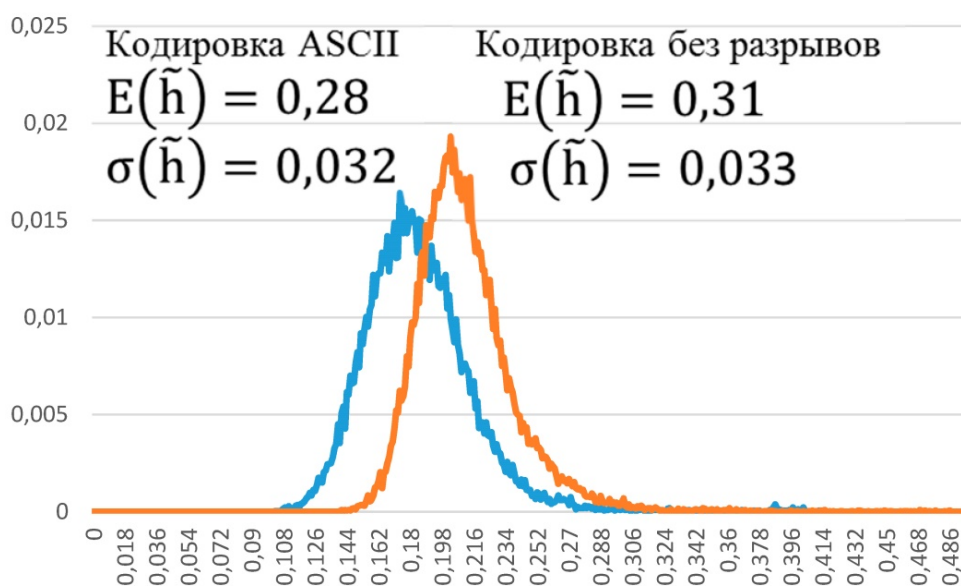


Рис. 2. Соотношение распределений расстояний Хэмминга в кодировке без разрывов между группами символов и кодировке ASCII

Как видно из рис. 2, распределения расстояний Хэмминга имеют сопоставимые значения среднеквадратичного отклонения и математического ожидания. Это связано с тем, что отношение количества «некомпактно» расположенных кодов знаков препинания кодировки к «компактно» расположенным кодам кириллицы в ASCII-кодировке невелико – порядка 10 %.

Рассмотренные процедуры вычисления свертки Хэмминга можно сделать более устойчивыми за счет упорядочивания кодов по вероятности встречи символа в тексте. Один из возможных примеров данного метода регуляризации вычисления энтропии является кодировка, приведенная в табл. 2.

Таблица 2

Таблица перекодировки упорядоченных групп символов «кириллица»
и знаков препинания для текстов на русском языке

Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа	Символ	Код символа
	0	ь	18	О	36	ъ	54
о	1	ы	19	К	37	Р	55
е	2	г	20	Л	38	Г	56
а	3	б	21	С	39	У	57
н	4	ч	22	Д	40	З	58
и	5	з	23	–	41	Ф	59
т	6	.	24	И	42	Х	60
с	7	ж	25	П	43	Ш	61
л	8	й	26	Я	44	Щ	62
в	9	ш	27	ф	45	Ж	63
р	10	х	28	Т	46	Ц	64
к	11	ю	29	М	47	«	65
,	12	э	30	...	48	Ь	66
д	13	А	31	:	49	Ю	67
м	14	щ	32	Ч	50	е	68
у	15	ц	33	Е	51	Й	69
п	16	В	34	Э	52	Ъ	70
я	17	Н	35	Б	53	Ы	71

На рис. 3 сопоставлены усредненные результаты вычисления распределения расстояний Хэмминга для 10 осмысленных паролей на русском языке, длиной 256 бит с эталонным текстом длиной 32 000 символов, в кодировке ASCII и кодировке без разрывов между группами символов в соответствии с табл. 2.

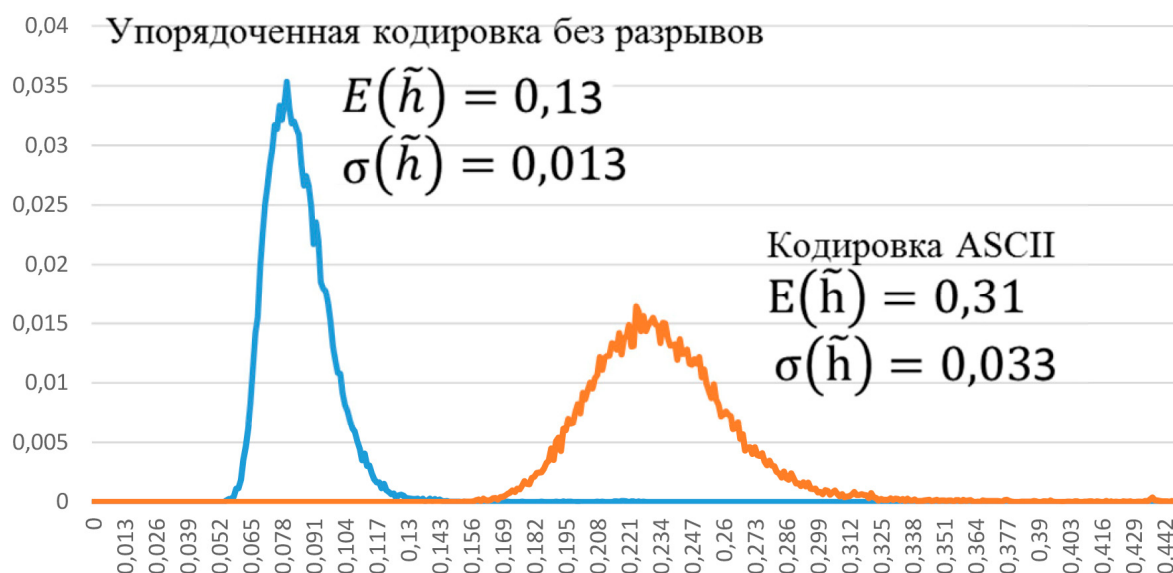


Рис. 3. Соотношение распределений расстояний Хэмминга в упорядоченной кодировке без разрывов между группами символов и кодировке ASCII

Для оценки полученных результатов на рис. 4 приведены результаты вычисления распределения расстояний Хэмминга в случайно упорядоченной кодировке без разрывов.

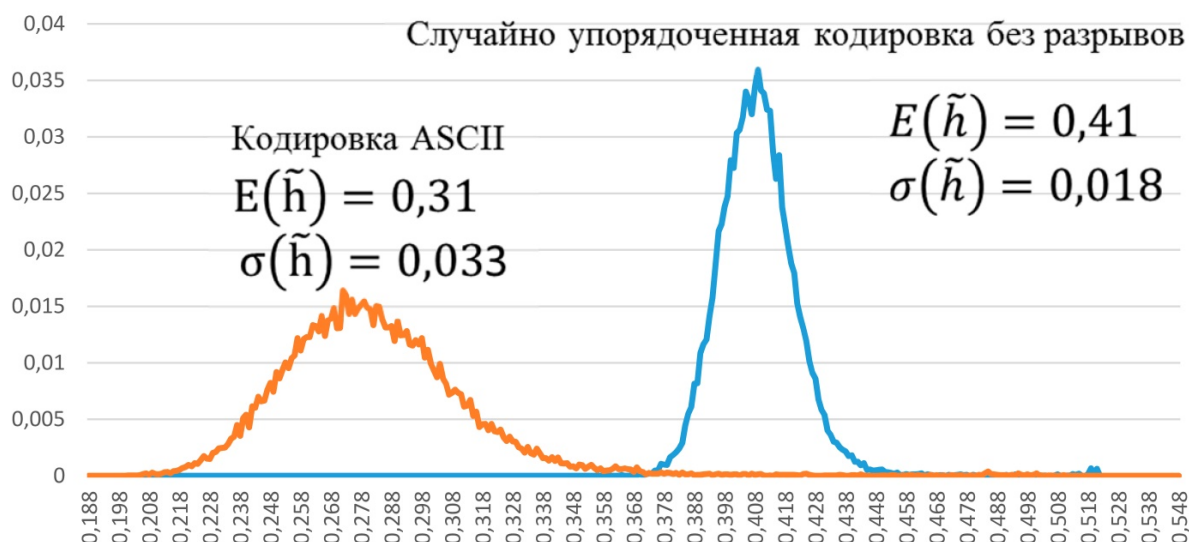


Рис. 4. Соотношение распределений расстояний Хэмминга в случайно упорядоченной кодировке без разрывов между группами символов и кодировке ASCII

Преимущества использования регуляризации вычислений энтропии длинных кодов с зависимыми разрядами

Статистические характеристики распределений расстояний Хэмминга для каждой из вышеуказанных кодировок были сведены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики распределений расстояний Хэмминга для различных кодировок

Характеристика	ASCII	Устранены разрывы	Сортировка по возрастанию	Случайная сортировка
$\sigma(\tilde{h})$	0,032	0,033	0,013	0,021
$E(\tilde{h})$	0,28	0,31	0,13	0,41

Наибольшее среднеквадратичное отклонение ($\sigma = 0,032$) наблюдаем при использовании ASCII-кодировки, практически сопоставимое ($\sigma = 0,033$) – при устранении разрывов между кодами букв «кириллицы» и кодами знаков препинания, наименьшее ($\sigma = 0,013$) – при кодировке, без разрывов между кодами букв «кириллицы» и кодами знаков препинания с упорядочиванием кодов по вероятности встречи символа в тексте. Необходимо отметить, что среднеквадратичное отклонение при использовании случайной кодировки (без разрывов) также ниже относительно стандартной кодировки ASCII.

Руководствуясь полученными результатами, можно заключить, что при использовании «оптимальной» кодировки можно обеспечить снижение требований к тестовой выборке символов.

Таким образом, требования к тестовой выборке можно снизить, оценивая энтропию в пространстве сверток Хэмминга более устойчивыми методами, осуществляя предварительную перекодировку символов ASCII, обеспечивающую минимизацию значения математического ожидания расстояний Хэмминга и их стандартного отклонения.

Библиографический список

1. NIST Special Publication 800-63B. Digital Identity Guidelines. Authentication and Lifecycle Management. Paul A. Grassi, James L. Fenton.
2. ГОСТ Р 52633.3–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Тестирование стойкости средств высоконадежной биометрической защиты к атакам подбора.
3. Иванов, А. И. Оценка усиления стойкости коротких цифровых паролей (PIN кодов) при их рукописном воспроизведении / А. И. Иванов, О. В. Ефимов, В. А. Фунтиков // Защита информации. INSIDE. – 2006. – № 1. – С. 55–57.

4. Малыгин, А. Ю. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации / А. Ю. Малыгин, В. И. Волчихин, А. И. Иванов, В. А. Фунтиков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2006. – 161 с.
5. Иванов, А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции / А. И. Иванов. – Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2016. – 133 с. – URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf>
6. Волчихин, В. И. Условия корректного вычисления энтропии осмысленных длинных паролей в пространстве сверток Хэмминга с эталонными текстами на русском и английском языках / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Карпов, А. П. Юнин // Безопасность информационных технологий : сб. ст. по результатам Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения одного из основоположников советской вычислительной техники Б. И. Рамеева. – Пенза, 2019. – С. 59–65. – URL: <http://rosoperator.ru/rameev100>

References

1. NIST Special Publication 800-63B. Digital Identity Guidelines. Authentication and Lifecycle Management. Paul A. Grassi, James L. Fenton.
2. GOST R 52633.3–2011. Zashchita informatsii. Tekhnika zashchity informatsii. Testirovanie stoykosti sredstv vysokonadezhnoy biometricheskoy zashchity k atakam podbora [GOST R 52633.3–2011. Information protection. Information security techniques. Testing the resistance of highly reliable biometric security tools to selection attacks]. [In Russian]
3. Ivanov A. I., Efimov O. V., Funtikov V. A. Zashchita informatsii. INSIDE [Information protection. INSIDE]. 2006, no. 1, pp. 55–57. [In Russian]
4. Malygin A. Yu., Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Funtikov V. A. Bystrye algoritmy testirovaniya neyrosetevykh mekhanizmov biometriko-kriptograficheskoy zashchity informatsii [Fast algorithms for testing neural network mechanisms for biometrico-cryptographic information protection]. Penza: Izd-vo PGU, 2006, 161 p. [In Russian]
5. Ivanov A. I. Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programmnyim vosproizvedeniem effektivov kvantovoy superpozitsii [Multidimensional neural network processing of biometric data with software reproduction of quantum superposition effects]. Penza: Izd-vo AO «PNI EI», 2016, 133 p. Available at: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf> [In Russian]
6. Volchikhin V. I., Ivanov A. I., Karpov A. P., Yunin A. P. Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. st. po rezul'tatam Vseros. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 100-letiyu so dnya rozhdeniya odnogo iz osnovopolozhnikov sovetskoy vychislitel'noy tekhniki B. I. Rameeva [Information technology security: a collection of articles based on the results of the all-Russian scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of one of the founders of Soviet computer technology, B. I. Rameyev]. Penza, 2019, pp. 59–65. Available at: <http://rosoperator.ru/rameev100> [In Russian]

Волчихин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор,
президент Пензенского государственного
университета
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: president@pnzgu.ru

Volchikhin Vladimir Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
President of Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Иванов Александр Иванович

доктор технических наук, профессор,
начальник лаборатории,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: пниэи@penza.ru

Ivanov Aleksandr Ivanovich

doctor of technical sciences, professor,
head of the laboratory,
Penza Scientific Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Карпов Артем Павлович

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: artem.karpei@mail.ru

Karpov Artem Pavlovich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Юнин Алексей Петрович

специалист,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: pniei@penza.ru

Yunin Alexey Petrovich

specialist,
Penza Scientific Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Волчихин, В. И. Возможности регуляризации вычислений энтропии длинных осмысленных паролей в пространстве сверток Хэмминга / В. И. Волчихин, А. И. Иванов, А. П. Карпов, А. П. Юнин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 43–50. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-5.

П. Г. Королев

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ С МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ САМОКОНТРОЛЕМ

P. G. Korolev

MEASURING INSTRUMENTS WORK ORGANIZATION WITH METROLOGICAL SELF-CONTROL

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Актуальность темы работы обусловлена существованием областей применения средств измерений, в которых метрологическое обслуживание затруднено или невозможно. Целью работы является разработка правил функционирования средств измерений, обладающих системой метрологического автосопровождения, основанной на методе образцовых сигналов. **Результаты.** Разработан подход к организации работы средств измерений в зависимости от соотношения скорости дрейфа метрологических характеристик и частоты дискретизации. Приведены примеры применения непараметрического рангового критерия, демонстрирующие ограничения его возможностей. Разработаны правила, препятствующие возникновению ошибок второго рода. Определены задачи, решаемые системой метрологического автосопровождения. Разработан граф состояний средств измерений с метрологическим самоконтролем. **Выводы.** Возможна статистически обоснованная коррекция характеристики преобразования в условиях малой выборки. Системы метрологического автосопровождения целесообразно разрабатывать с применением теории автоматов.

A b s t r a c t. Background. The relevance of the topic is due to the existence of measuring spheres, in which metrological service is difficult or impossible. The aim of the work is to develop the operation rules for the Measurement Instruments, having a metrological auto-tracking system, based on the exemplary signals method. **Results.** An approach to the organization of measuring instruments depending on the ratio of the metrological characteristics drift velocity and the sampling frequency is developed. Examples of nonparametric rank criterion application are given to demonstrate the its capabilities limitations. Rules have been developed to prevent the occurrence of second kind errors. The metrological auto-tracking system tasks are defined. A measuring instruments graph of states with metrological self-control is developed. **Conclusion.** There could be a statistically valid correction of the conversion characteristic in a small sample. The system of metrological automatic tracking it is advisable to develop with the use of automata theory.

К л ю ч е в ы е с л о в а : метрологическое автосопровождение, коррекция погрешности, ранговый критерий, граф состояний средства измерений.

Key words: metrological tracking, correction of errors, the rank criterion, the state graph of a measuring instrument.

Введение

Обеспечение метрологической исправности средств измерений (СИ) является сложной технической и важной экономической задачей. Существуют предметные области, в которых метрологическое сопровождение СИ затруднено с организационно-технической точки зрения

или высокочастотной с экономической. Это исследования в труднодоступных регионах, обеспечение безопасности транспортных систем. Одним из способов обеспечения метрологической исправности СИ является коррекция характеристики преобразования по результатам калибровочных измерений. Калибровочные измерения осуществляются с помощью многозначной меры (ММ), которой оснащаются средства измерений.

Результат калибровочного измерения так же, как и результат измерения физической величины, в общем случае является случайной величиной, зависящей от нескольких факторов: собственных шумов в аналоговой и цифровой части СИ, внешней помеховой обстановки, климатических факторов и т.п., приводящих к появлению дополнительных погрешностей и выбросам. Коррекция по методу образцовых сигналов позволяет уменьшить систематическую составляющую погрешности, но при однократных измерениях увеличивает случайную составляющую [1]. Следовательно, необходимо определить правила функционирования СИ, оснащенных СМАС, основанные на статистически обоснованной коррекции характеристики преобразования.

Организация коррекции характеристики преобразования

Условия применения средств измерений с точки зрения интенсивности использования могут значительно различаться.

Возможны три случая:

1) максимальная частота дискретизации измерительного канала f_d намного превышает частоту измерений в эксперименте $f_{\text{и}}$:

$$f_d \gg f_{\text{и}}. \quad (1)$$

В этом случае система метрологического сопровождения в состоянии накопить репрезентативную выборку и принять решение о необходимости коррекции, ориентируясь на пороговые значения, а также оценить вероятность принятия неверного решения;

2) частота дискретизации измерительного канала f_d в несколько раз превышает частоту измерений в эксперименте $f_{\text{и}}$:

$$f_d = n \times f_{\text{и}}. \quad (2)$$

В данном случае на возможность коррекции характеристики преобразования (ХП) влияет соотношение скорости дрейфа ХП и периода измерений $T_{\text{и}}$, $T_{\text{и}} = 1 / f_{\text{и}}$:

а) если время, за которое возможно изменение метрологических характеристик $T_{\text{д}}$, значительно превышает $T_{\text{и}}$, также существует возможность накопления репрезентативной выборки

$$f_d = n \times f_{\text{и}} \wedge T_{\text{д}} \gg T_{\text{и}}; \quad (3)$$

б) если время, за которое возможно изменение метрологических характеристик, сопоставимо с $T_{\text{и}}$, $f_d = n \times f_{\text{и}} \wedge T_{\text{д}} \approx T_{\text{и}}$, решение о коррекции характеристики преобразования нужно принимать, основываясь на сравнении малых выборок, с использованием непараметрических ранговых критериев.

Система метрологического сопровождения решает следующие задачи:

1) осуществляет калибровочные измерения, формирует выборки, достаточные для принятия статистически обоснованного решения, сохраняет их в энергонезависимой памяти;

2) осуществляет проверку значимости расхождения выборок, тем самым устанавливая факт изменения погрешности СИ;

3) вводит коррекцию в функцию преобразования.

Возможны две ситуации: закон распределения случайной составляющей погрешности нормальный и закон распределения неизвестен и, возможно, отличен от нормального. В первом случае при выполнении неравенства (1) для проверки расхождения двух выборок может быть применен критерий Стьюдента, во втором случае – критерий Манна и Уитни [2]. При выполнении неравенства (2) время, выделяемое на калибровочные измерения, ограничено и может сокращаться вследствие увеличения скорости нарастания погрешности, что еще больше усложняет ситуацию ввиду необходимости проводить проверку гипотезы о расхождении средних значений выборок различного объема.

На рис. 1 на горизонтальной оси указаны моменты времени, в которые выполняется калибровка измерительного канала и при необходимости корректируется ХП, на вертикальной – величина погрешности, соответствующая классу точности Δ_p , значения Δ_1 и Δ_2 – значения погрешностей, при которых их расхождение выборок признается значимым. На рис. 1 представлен график, иллюстрирующий увеличение погрешности, коррекцию характеристики преобразования, а также тенденцию к увеличению скорости нарастания погрешности. Вместо коррекции через четыре межкалибровочных интервала $t_0 \dots t_4$, $t_4 \dots t_8$ очередная коррекция выполнена через три интервала ($t_8 \dots t_{11}$).

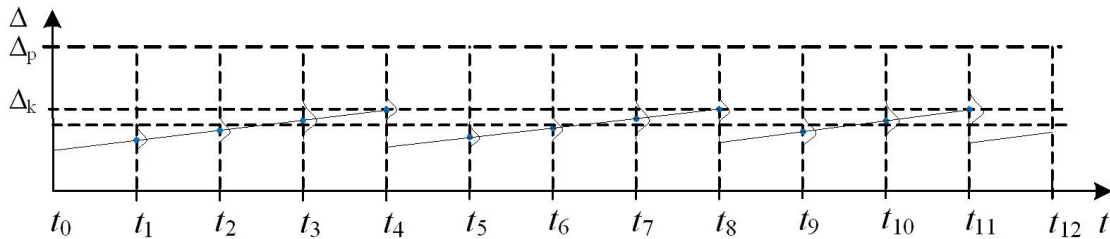


Рис. 1

В результате проведения i калибровки формируется массив значений $\{M_i\}$:

$$\{M_i\} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{n1} & \dots & x_{N1} \\ \dots & & & & \\ x_{1k} & \dots & x_{nk} & \dots & x_{Nk} \\ \dots & & & & \\ x_{1K} & \dots & x_{nK} & \dots & x_{NK} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где x – результаты калибровочных измерений, N – объем выборки, K – количество точек калибровки.

Ранее были проведены эксперименты с макетом измерительного канала с автоматической коррекцией [3]. Установлено, что закон распределения случайной составляющей погрешности отличен от нормального и случайная составляющая вносит существенный вклад в результирующую погрешность ($\Delta_{\text{случ.}} > 0,1 \times \Delta_{\text{систем.}}$), тем не менее при формировании усредненных результатов по выборкам из шести и десяти отсчетов имело место снижение разброса в 4–5 раз при том же математическом ожидании. Закон распределения выборочных средних близок к нормальному.

Применение рангового критерия

Критерий Манна и Уитни допускает сравнение выборок в три отсчета, возможно также наличие в одной из выборок двух отсчетов, но при этом в другой должно быть не менее пяти отсчетов. Эксперименты с критерием Манна – Уитни показывают, что при выборках размером три отсчета для определения расхождения как значимого, необходимо полное расхождение выборок (отсутствие перекрытия). Аналогичная ситуация при сравнении выборок, когда в одной из них два отсчета, в другой – пять и более. К сожалению, в малой выборке также возможны выбросы. Исследование критерия Манна и Уитни на устойчивость к выбросам показывает [4], что он достаточно устойчив к ошибкам первого рода. При сравнении выборок из шести отсчетов при фактически значимом расхождении математических ожиданий при одном выбросе склонен к ошибкам второго рода (рис. 2). При сравнении выборок по шесть отсчетов критерий показывает значимое расхождение при перекрытии в два отсчета, при этом при значительном отклонении единственного отсчета (ранг = 3 и менее) критерий склонен к ошибке второго рода, что приводит к необходимости исключения выброса из малых выборок.

Таблица 1

Номер отсчета	Номера выборок						
	1	2	3	4	5	6	7
1	80,0	81,4	81,6	82,4	80,4	81,2	80,9
2	80,5	81,9	82,1	82,9	82,9	82,9	82,9
3	81,0	82,4	82,6	83,4	83,4	83,4	83,4
4	81,5	82,9	83,1	83,9	83,9	83,9	83,9
5	82,0	83,4	83,6	84,4	84,4	84,4	84,4
6	82,5	83,9	84,1	84,9	84,9	84,9	84,9
Расхождение относительно выборки 1:		не определено	значимо	значимо	не определено	значимо	не определено

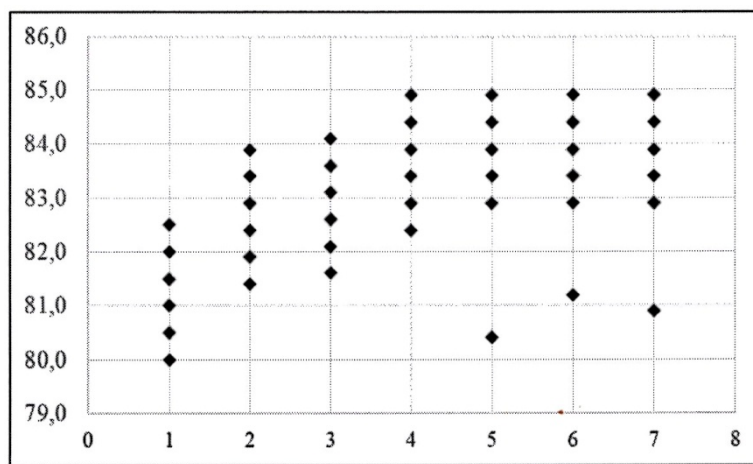


Рис. 2

На рис. 2 по горизонтальной оси представлены номера выборок, по вертикальной – значения в единицах измеряемой величины.

Сформулируем правило для исключения выброса из выборки в шесть отсчетов: если $\forall \{R_{22}, R_{23}, R_{24}, R_{25}, R_{26}\} > \{R_{11}, R_{12}, R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}\} \wedge \exists R_{21} < \{R_{13}, R_{14}, R_{15}, R_{16}\}$, то исключается отсчет X_{21} , которому соответствует ранг R_{21} и критерий применяется повторно.

В табл. 2 и на рис. 3 представлены результаты проверки значимости расхождения выборок в 10 отсчетов при трех выбросах.

Таблица 2

Номер отсчета	Номер выборки						
	1	2	3	4	5	6	7
1	80,0	81,4	81,6	82,4	81,4	80,4	80,0
2	80,5	81,9	82,1	82,9	81,9	80,9	80,2
3	81,0	82,4	82,6	83,4	82,4	81,4	80,4
4	81,5	82,9	83,1	83,9	84,9	84,9	84,9
5	82,0	83,4	83,6	84,4	85,4	85,4	85,4
6	82,5	83,9	84,1	84,9	85,9	85,9	85,9
7	83,0	84,4	84,6	85,4	86,4	86,4	86,4
8	83,5	84,9	85,1	85,9	86,9	86,9	86,9
9	84,0	85,4	85,6	86,4	87,4	87,4	87,4
10	84,5	85,9	86,1	86,9	87,9	87,9	87,9

Критерий дает приемлемые результаты уже при объеме выборок в 10 отсчетов: значимость расхождения устанавливается при расхождении в пять отсчетов и равных дисперсиях (рис. 3, табл. 2, выборки 1 и 4). Также при десяти отсчетах критерий демонстрирует устойчи-

вость и к ошибкам второго рода: он нечувствителен к одному и двум выбросам при расхождении в 8 – 9 отсчетов; при расхождении в 7 отсчетов три оставшихся отсчета выборки Н0 должны иметь отклонение на уровне крайних отсчетов второй выборки Н1. Для выборки в 10 отсчетов при расхождении в 7 отсчетов следует исключить отсчет с рангом ≤ 2 (рис. 3, для выборок 1 и 7 критерий показывает незначимое расхождение).

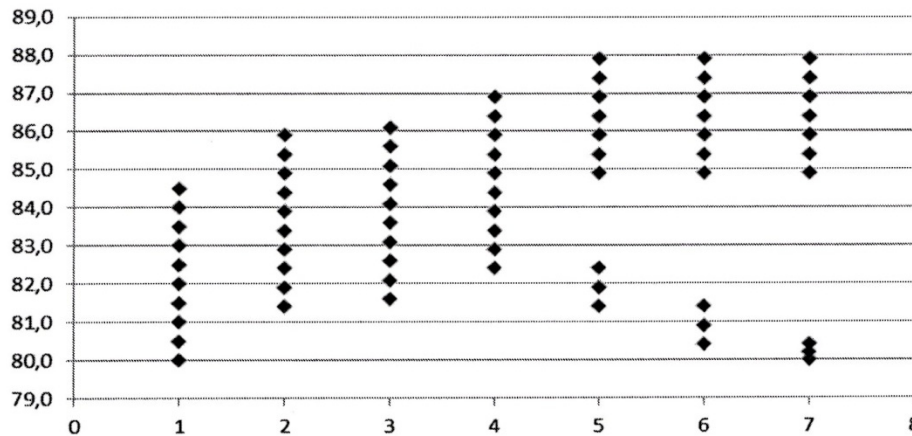


Рис. 3

Таким образом, при выполнении условия (1) и (3) объем выборки следует устанавливать равным 10.

Введем следующие термины:

- «нулевой» массив отсчетов (НМ) $\{M_0\}$ – набор отсчетов, сформированный после первичной поверки в начале эксплуатации СИ;
- опорный массив отсчетов (ОМ) – на первом межповерочном интервале в качестве ОМ используется НМ;
- массив отсчетов калибровки i $\{M_i\}$ – набор отсчетов n , сформированный в i временном сечении;
- массив отсчетов калибровки $i-1$ $\{M_{i-1}\}$ – набор отсчетов n , сформированный в предшествующем временном сечении в это состояние переводится $\{M_i\}$, если коррекция ХП не проводилась; в случае, если коррекция была проведена, выборка формируется заново;
- постповерочный массив отсчетов (ППМ) – набор отсчетов n , сформированный после очередной поверки в случае, если проводилось техническое обслуживание СИ с коррекцией ХП; на следующем межповерочном интервале эта выборка используется в качестве ОВ.

Пример: в ряде калибровочных точек математическое ожидание выборки $\{M_i\}$ больше математического ожидания выборки НМ ($\{M_0\}$) $Mx_2 > Mx_1$, но критерий не показывает значимости расхождений выборок. Причиной является наличие в выборке выброса. Для исключения отсчета, провоцирующего ошибку второго рода, следует воспользоваться сравнением значений рангов. Множества отсчетов и множества рангов упорядочиваются по неубыванию. В общем случае, если $\forall \{R_{22}, \dots, R_{2i}, \dots, R_{2N}\} > \{R_{11}, \dots, R_{1i}, \dots, R_{1M}\} \wedge \exists R_{2i} < \{R_{12}, \dots, R_{1i}, \dots, R_{1M}\}$, результат, имеющий ранг R_{2i} , следует исключить из выборки.

Метрологическое автосопровождение СИ

Исходное состояние есть сформированный при изготовлении СИ или при вводе его в эксплуатацию.

Представим работу программы метрологического автосопровождения в виде автоматного графа.

Состояния:

- S1: формирование массива первичных выборок (так называемый «нулевой») формата (4);
- S2: измерения;
- S3: формирование i выборки;
- S4: сравнение i выборки и нулевой выборки;

- С5: сравнение i выборки и $i-1$ выборки;
 С6: поверка;
 С7: формирование первичной постповерочной выборки;
 С8: самоконтроль СМАС;
 С9: техническое обслуживание.

Условия:

- У1: истечение межкалибровочного интервала $t \geq \Delta t_{\text{мки}}$;
 У2: математическое ожидание выборки i значительно превышает математическое ожидание предшествующей выборки $M_i > M_{i-1}$;
 У3: математическое ожидание выборки i значительно превышает математическое ожидание нулевой выборки $M_i > M_0$;
 У4: истечение межповерочного интервала $t > \Delta t_{\text{мпи}}$;
 У5: первая калибровка после формирования нулевой выборки $i = 1$.
 У6: СИ соответствует своему классу точности;
 У7: успешное ТО;
 У8: необходимость самоконтроля СМАС;
 У9: СМАС исправна.

Действия:

- Д1: увеличение номера выборки $i := i + 1$;
 Д2: вычисление коэффициентов полинома ХП и коррекция;
 Д3: архивирование нулевой выборки;
 Д4: архивирование калибровочных выборок;
 Д5: архивирование постповерочной предыдущей выборки;
 Д6: сокращение $\Delta t_{\text{мки}}$.
 Д7: переход в режим без МАС;
 Д8: замена СИ.

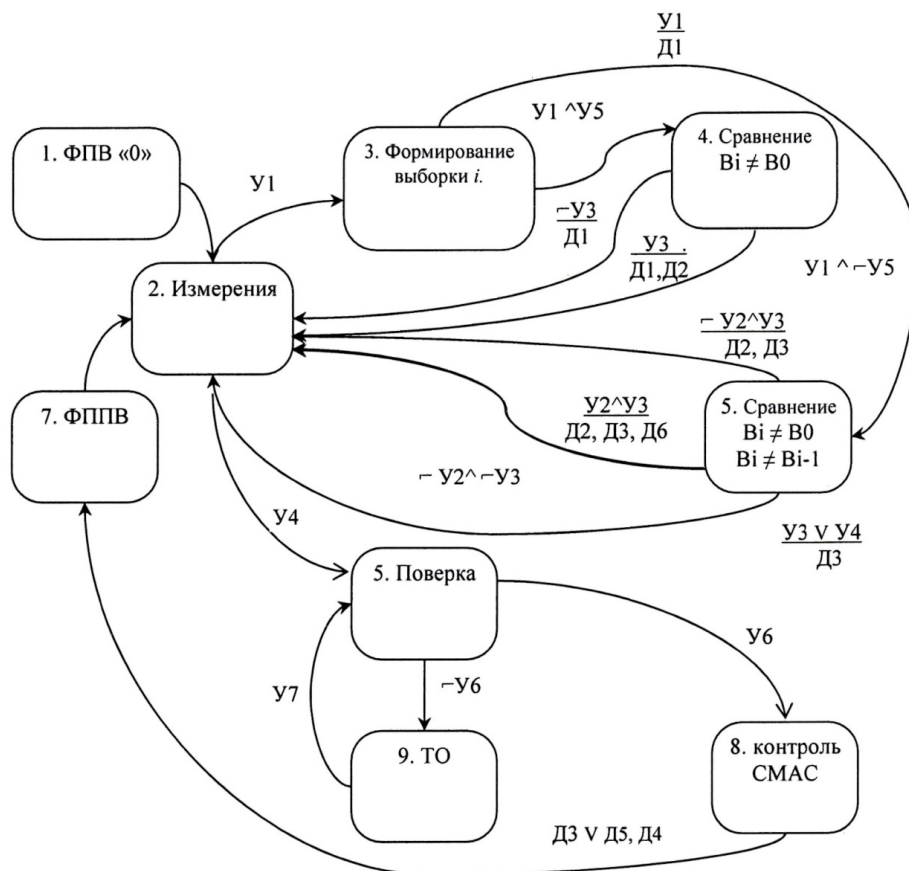


Рис. 4

Данный граф состояний показывает последовательность и условия формирования выборок калибровочных измерений, порядок принятия решений о коррекции характеристики преобразования.

Заключение

Таким образом, сформулированы правила функционирования СИ, оснащенных системой метрологического сопровождения. Правила предусматривают принятие решения о коррекции характеристики преобразования на основе анализа малых выборок, а также работу СИ в процессе эксплуатации, представленную в виде графа состояний.

Библиографический список

1. Земельман, М. А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М. А. Земельман. – Москва : Издательство стандартов, 1972. – 600 с.
2. Закс, Л. Статистическое оценивание / Л. Закс. – Москва : Статистика, 1976. – 598 с.
3. Korolev, P. G. Research of the measuring channel with automatic correction data conversion / P. G. Korolev, A. V. Utushkina, A. V. Tsareva, N. A. Kuzmina // Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference. – St. Petersburg, 2016. – P. 418–421.
4. Королев, П. Г. Оценка дефектов железнодорожного полотна. Исследование критерия / П. Г. Королев, В. А. Костыря, С. А. Кук, О. А. Микус // XXI Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2018. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 85–88.

References

1. Zemel'man M. A. *Avtomaticeskaya korrektsiya pogreshnostey izmeritel'nykh ustroystv* [Automatic correction of measurement device errors]. Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1972, 600 p. [In Russian]
2. Zaks L. *Statisticheskoe otsenivanie* [Statistical estimation]. Moscow: Statistika, 1976, 598 p. [In Russian]
3. Korolev P. G., Utushkina A. V., Tsareva A. V., Kuzmina N. A. *Proceedings of the 2016 IEEE North West Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference*. Saint-Petersburg, 2016, pp. 418–421.
4. Korolev P. G., Kostyrya V. A., Kuk S. A., Mikus O. A. *XXI Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam. SCM'2018* [XXI international conference on soft computing and measurement. SCM '2018]. Saint-Petersburg, 2018, pp. 85–88. [In Russian]

Королев Павел Геннадьевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительных систем
и технологий,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. проф. Попова, 5)
E-mail: pgkorolev@gmail.com

Korolev Pavel Gennadievich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information-measuring systems
and technologies,
Saint Petersburg Electrotechnical University
(5 prof. Popov street, Saint-Petersburg, Russia)

Образец цитирования:

Королев, П. Г. Организация работы средств измерений с метрологическим самоконтролем / П. Г. Королев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 51–57. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-6.

**ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ИЗДЕЛИЯ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

УДК 004.934

DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-7

*А. К. Алимуратов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, Б. В. Султанов***СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТНОЙ РАЗБОРЧИВОСТИ
РЕЧИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОЭМОЦИОНАЛЬНОГО
СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
С ВЫСОКОЙ СТЕПЕНЬЮ ОТВЕТСТВЕННОСТИ***A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, P. P. Churakov, B. V. Sultanov***METHOD TO DETERMINE FORMANT SPEECH
INTELLIGIBILITY FOR ESTIMATING PSYCHO-EMOTIONAL
STATE OF CONTROL SYSTEM OPERATORS
WITH A HIGH DEGREE OF RESPONSIBILITY**

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* На сегодняшний день для оценки психоэмоционального состояния применяются различные способы, основанные на анализе: мимики и жестикуляции, параметров физиологической активности организма, биохимических параметров крови, параметров рукописного и клавиатурного написания текстов, окулографии и др. Наиболее адаптивными являются способы на основе анализа речи. Целью работы является разработка способа определения формантной разборчивости речи для повышения эффективности оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности. *Материалы и методы.* В разработке способа использовались: уникальная технология адаптивной декомпозиции нестационарных сигналов – улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом; формантный анализ. Программная реализация способа была выполнена в среде математического моделирования © Matlab (MathWorks). *Результаты.* Разработан способ оценки психоэмоционального состояния, применимый для операторов систем управления с высокой степенью ответственности. Суть способа заключается в адаптивном разложении речевого сигнала на равноартикуляционные полосы частот, с помощью улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом и определении формантной разборчивости, а также частоты, ширины, уровня и добротности формантных областей в данных полосах с помощью формантного анализа. Кратко представлены математическое описание декомпозиции и упрощенная блок-схема предложенного способа. Проведено исследование способа с использованием сформированной базы фонетически сбалансированных речевых сигналов, зарегистрированных у здоровых людей и людей с психоэмоциональными расстройствами. *Выводы.* В соответствии с результатами исследования разработанный способ обеспечивает высокую точность определения психоэмоциональных расстройств (ошибка первого рода 8,16 %,

ошибка второго рода 5,66 %) и может успешно тестироваться для оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности.

A b s t r a c t. Background. At present, various methods based on analysis of facial expressions and gesticulation, parameters of physiological activity of the organism, blood biochemical parameters, parameters of text handwriting and keyboarding, oculography, etc. are used to assess psycho-emotional state. Methods based on speech analysis are the most adaptive. The purpose of the work is to develop a method for determining formant intelligibility of speech to increase the assessment efficiency of psycho-emotional state of control system operators with a high degree of responsibility. **Materials and methods.** A unique technology for adaptive decomposition of non-stationary signals, namely, the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, and formant analysis were used in the development of the method. Software implementation of the method was performed in the mathematical modeling environment © Matlab (MathWorks). **Results.** A method for assessing psycho-emotional state, applicable to control system operators with a high degree of responsibility, has been developed. The nature of the method consists in adaptive decomposition of a speech signal into frequency bands of equal articulation, using the improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, and determining formant intelligibility, as well as frequency, width, level and quality factor of formant regions in these bands using formant analysis. A mathematical description of the decomposition and a simplified block diagram for the proposed method are briefly presented. A study of the method was conducted using a formed base of phonetically balanced speech signals recorded in healthy people and people with psycho-emotional disorders. **Conclusions.** In accordance with the research results, the developed method provides high determination accuracy of psycho-emotional disorders (the first kind error is 8.16 %, the second kind error is 5.66 %), and can be successfully tested to assess psycho-emotional state of control system operators with a high degree of responsibility.

К л ю ч е в ы е с л о в а: речевой сигнал, улучшенная полная множественная декомпозиция на эмпирические моды с адаптивным шумом, формантная разборчивость, формантный анализ, психоэмоциональное расстройство.

Key words: speech signal, improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, formant intelligibility, format analysis, psycho-emotional disorder.

Введение

Оценка психоэмоционального состояния человека на сегодняшний день является важной социально значимой проблемой [1]. Особенно это важно в тех отраслях человеческой деятельности, которые сопряжены с повышенным риском возникновения техногенных аварий.

На сегодняшний день для оценки психоэмоционального состояния применяются различные способы, основанные на анализе: мимики и жестикуляции, параметров физиологической активности организма, биохимических параметров крови, параметров рукописного и клавиатурного написания текстов и окулографии [2]. Недостатком указанных способов является контакт с человеком (регистрация, взятие пробы, написание и т.п.), что, безусловно, влияет на психоэмоциональное состояние, эффективно оценить которое уже не представляется возможным. Наиболее адаптивным является способ на основе анализа речевых сигналов [3].

В последние два десятилетия исследования в области оценки психоэмоционального состояния по речи активно поддерживаются международными фондами и грантами организаций:

– «Deep Learning Speech Enhancement», Industry Cooperation with HUAWEI TECHNOLOGIES, 12.11.2016 – 11.11.2018;

– «Training network on Automatic Processing of Pathological Speech» (#766287), EU H2020 Marie Skłodowska-Curie Innovative Training Networks European Training Networks (MSCA-ITN-ETN: ENG), 01.11.2017 – 31.10.2021;

– «Sentiment Analyses», Industry Cooperation with BMW AG, 01.05.2018 – 31.05.2021;

– «Поиск скрытых паттернов пограничных психических расстройств и разработка системы экспресс оценки состояния психического здоровья человека», Российский научный фонд (№ 17-71-20029), 01.09.2017 – 31.07.2020.

На рынке речевых технологий представлены коммерческие системы оценки психоэмоционального состояния человека: «*lingWAVES*» [4] и «*Sense*» [5]. Наибольший интерес в данных системах представляют способы обработки речевых сигналов и возможность их применения для операторов систем управления с высокой степенью ответственности. Однако в силу коммерческой тайны производители такую информацию не предоставляют. По этой причине модернизация существующих и разработка новых способов обработки речевых сигналов остаются в центре внимания специалистов при создании систем «человек – машина».

Целью данного исследования является определение формантной разборчивости речи операторов систем управления с высокой степенью ответственности для оценки психоэмоционального состояния на основе адаптивных технологий обработки речевых сигналов. Работа является развитием ранее опубликованных трудов авторов [2, 6] и выполнена при финансовой поддержке совета по грантам Президента РФ, проект «Исследование информативно-значимых параметров речевых сигналов: поиск уникально новых признаков естественно выраженных эмоций для повышения точности оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности» № СП-246.2018.5, 2018–2020 гг.

Речеобразующая система и речь

Речеобразующая система человека состоит из легких, трахеи, полости глотки (горла), языка, ротовой и носовой полостей (рис. 1,а). Воздушный поток, выдавливаемый из легких, проходит через голосовые связки и речевой тракт, колеблясь на разных частотах.

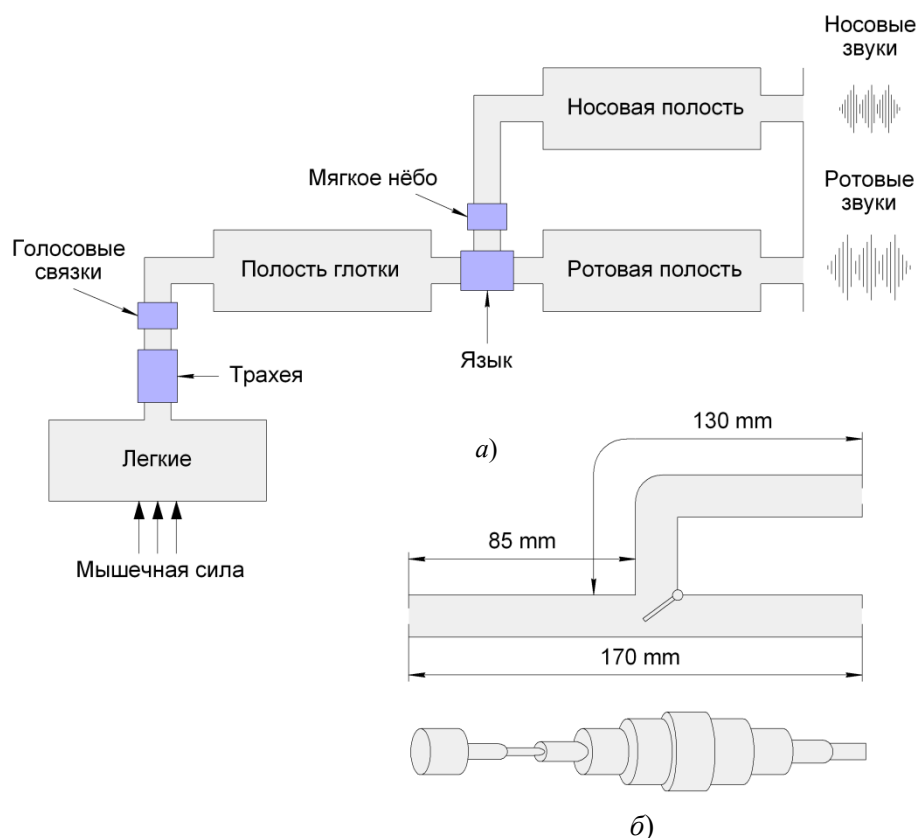


Рис. 1. Речеобразующая система человека

Речевой сигнал представляет собой нестационарный акустический сигнал сложной формы, амплитудные и частотные характеристики которого быстро изменяются во времени. Речь состоит из вокализованных и невокализованных участков, образующихся соответственно в результате периодических и непериодических колебаний голосовых связок. Периодические

колебания голосовых связок называется основным тоном. Частота колебаний связок называется частотой основного тона.

Известно, что звуки являются неделимыми элементами речи, характеризуются уникальным распределением энергии в спектральной области. В спектре каждого звука речи присутствуют области повышенной концентрации энергии, называемые формантами. Расположение формант, их число и параметры определяются самим процессом воспроизведения речеобразующей системой человека и позволяют однозначно установить звук речи. Изменяемый объем полостей гортани, рта, движения артикуляционного аппарата говорящего всегда подобны при создании каждого из звуков речи. Анатомические отличия людей друг от друга порождают отличия в высоте и тембре голоса, но характер распределения формант остается постоянным.

Формантная структура звуков, формантная разборчивость

Речевой тракт (рис. 1,б) представляет собой трубку неоднородного сечения, длиной 170 мм (у взрослого человека). Формантная структура звуков описывается резонансными частотами речевого тракта. Артикуляционный отдел речевого тракта очень чувствителен к нарушениям работы нервной системы. В работах [3, 7, 8] представлены результаты исследований частотной локализации формантных областей при патологиях в моторике артикуляционного отдела речевого тракта. Различные патологии (физиологические или психологические) вызывают смещения формантных областей по частоте и приводят к деформации и трансформированию звуков при воспроизведении. В соответствии с этим следует, что параметры формант (частота, ширина, уровень и др.) способны служить маркерами формантной разборчивости речи при психоэмоциональных расстройствах человека.

Разборчивость речи представляет собой меру понятности, выраженную относительным числом правильно понятых элементов речи: звуков, слогов, слов и фраз. Формантная разборчивость определяется произведением частотного F и динамического D диапазонов тракта связи, т.е. $A = kFD$, где k – коэффициент пропорциональности. Учитывая, что объем информации, передаваемой по речевому тракту за время T , также пропорционален произведению F и D , получаем $I = AT$, т.е. формантная разборчивость пропорциональна объему информации в единицу времени.

Несмотря на разнообразие применяемых обозначений, определений, большинство предложенных методов определения формантной разборчивости представляют собой развитие идей Колларда [9]. Теория разборчивости и методы определения основаны на представлении речевого сигнала в виде совокупности формант. Формантная теория расчета принимает форманты за элементы звуков речи, несущие информацию и определяющие разборчивость. Понятие «форманта» распространяется на все звуки речи. Нужно иметь в виду различие между смыслом, вкладываемым в это понятие формантной теории, и акустическим определением спектров звуков. Спектральный анализ звуков обнаруживает до десяти формант в отдельных случаях. Однако исследования речи показывают, что слуховое восприятие (по крайней мере для гласных звуков) полностью определяется четырьмя формантами, поэтому формантная теория относит к формантам только те области концентрации энергии в спектре, которые определяют звук.

Формантная теория разборчивости основана на предположении, что в пределах некоторой полосы частот речевого сигнала Δf_s вероятность встречаемости формант $\Delta A_{smax} = n_s/N$, где N – число формант во всей полосе частот речевого сигнала; n_s – число формант в полосе Δf_s .

Статистическое распределение формант речевого сигнала может отличаться от распределения формант, определяющих разборчивость речи, а уровень спектрального распределения речи может отличаться от спектрального распределения формант. Для оценки вероятности встречаемости формант в некоторой полосе частот речевого сигнала необходим анализ слухового восприятия звуков речи.

Адаптивная обработка

Формантный анализ успешно применяется для обнаружения и оценки психоэмоциональной окраски речи человека [3, 7–9]. Представленное разнообразие способов анализа обусловлено как важностью проблемы, так и отсутствием достаточно эффективных способов ее реше-

ния. Учитывая нерегулярность моторики речеобразующей системы при психоэмоциональных расстройствах, возможности этих способов существенно ограничены. Это ограничение обусловлено использованием неадаптивных методов обработки сложных нестационарных речевых сигналов. По этой причине актуальным является разработка новых способов, основанных на адаптированных методах обработки речевых сигналов, повышающих эффективность оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности.

Исследования методов обработки речевых сигналов выявили перспективность использования адаптивной технологии анализа нестационарных сигналов – улучшенной полной множественной декомпозиции на эмпирические моды с адаптивным шумом (ПМДЭМАШ) [10]. В настоящее время технология улучшенной ПМДЭМАШ широко используется в различных научных приложениях, в том числе и при решении задач оценки психоэмоционального состояния [11, 12].

Классическая декомпозиция на эмпирические моды (ДЭМ) – это адаптивный метод анализа нестационарных сигналов, возникающих в нелинейных системах, который обеспечивает локальное разложение сигнала на быстрые и медленные колебательные функции [13]. В результате разложения исходный сигнал представляется в виде суммы амплитудно- и частотно-модулированных функций – эмпирических мод (ЭМ). Аналитическое выражение ДЭМ выглядит следующим образом:

$$x(n) = \sum_{i=1}^I IMF_i(n) + r_i(n),$$

где $x(n)$ – исходный сигнал; $IMF_i(n)$ – ЭМ; $r_i(n)$ – конечный остаток; $i = 1, 2, \dots, I$ – номер ЭМ; n – дискретный отсчет времени ($0 < n \leq N$, N – количество дискретных отсчетов в сигнале).

Отличительной особенностью улучшенной ПМДЭМАШ является добавление к исходному сигналу контролируемого шума для создания новых экстремумов. Это позволяет устранить недостатки существующих разновидностей декомпозиций [10, 13]: смешивание ЭМ; остаточный шум в ЭМ; «паразитных» ЭМ на ранних этапах декомпозиции.

Алгоритм и математическое описание метода улучшенной ПМДЭМАШ:

1. С помощью аппарата ДЭМ и выражая из формулы $E_1(x_j(n)) = x_j(n) - M(x_j(n))$ локальные средние значения шумовых копий исходного сигнала ($x_j(n) = x(n) + \beta_0 E_1(w_j(n))$), определяется первый остаток

$$r_1(n) = M(x_j(n)),$$

где $E_i(\cdot)$ – аппарат извлечения ЭМ методом ДЭМ (i – номер моды); $x_j(n) = x(n) + w_j(n)$ – шумовые копии исходного сигнала ($x(n)$ – исходный речевой сигнал, $w_j(n)$ – реализации белого шума с нулевой средней единичной дисперсией); $M(\cdot)$ – аппарат, создающий локальное среднее значение применяемого сигнала; $\beta_i = \varepsilon_i \text{std}(r_i)$ – коэффициент, допускающий выбор различных значений отношения сигнал/шум.

2. На первом этапе для $i = 1$ вычисляется первая мода: $IMF_1(n) = x(n) - r_1(n)$.

3. Вычисляется второй остаток как усредненное локальное среднее значение шумовых копий первого остатка $r_1(n) + \beta_1 E_2(w_j(n))$ и определяется вторая мода:

$$\widetilde{IMF}_2(n) = r_1(n) - r_2(n) = r_1(n) - M(r_1(n) + \beta_1 E_2(w_j(n))).$$

4. На последующих этапах для $i = 3, \dots, I$ вычисляется i -й остаток

$$r_i(n) = M(r_{i-1}(n) + \beta_{i-1} E_i(w_j(n))).$$

5. Вычисляется i -я мода

$$\widetilde{IMF}_i(n) = r_{i-1}(n) - r_i(n).$$

6. Переход к шагу 4 для следующего значения i .

Константы β_i выбираются так, чтобы получить желаемое отношение сигнал/шум между добавленным шумом и остатком, к которому добавляется шум. Для получения шумовых реализаций с меньшими амплитудами для последних стадий декомпозиции в остальных модах будем воспринимать шум как результат его предварительной обработки ДЭМ, т.е. без их нормализации стандартным отклонением.

Описание способа

На рис. 2 представлена упрощенная блок-схема способа определения формантной разборчивости речи для оценки психоэмоционального состояния человека. Суть способа заключается в адаптивном разложении речевого сигнала на равноартикуляционные полосы частот, с помощью улучшенной ПМДЭМАШ и определении разборчивости в данных полосах с помощью формантного анализа. Структурно способ делится на четыре этапа: предварительная обработка (блоки 2–4), формантный анализ (блок 5/8), декомпозиция (блоки 6, 7) и непосредственное определение формантной разборчивости (блок 9). Блоки 11 и 12 применяются только для исследования предложенного способа. На рис. 3 представлена краткая иллюстрация, поясняющая функционирование способа. Рассмотрим вкратце этапы обработки предложенного способа.

Блок 1. Ввод речевого сигнала осуществляется со следующими параметрами: частота дискретизации 8000 Гц, разрядность квантования 16 бит. На рис. 3,а представлена осциллограмма речевого сигнала – предложение «Лара врала, что была королевой Урала».

Блок 2. Обнаружение вокализованных участков представляет собой определение точных границ звуков речи, образованных с участием голосовых связок в общем речевом потоке. Корректное обнаружение границ вокализованных участков не только повышает эффективность формантного анализа, но и уменьшает количество вычислительных операций. На рис. 3,б вокализованные участки отмечены прямоугольниками зеленого цвета. Неиспользуемые в дальнейшей работе способа невокализованные участки удалены.

Блок 3. Сегментация представляет собой линейное деление вокализованных участков речевого сигнала на составляющие отрезки, называемые фрагментами. В основе сегментации заложен принцип: свойства речевого сигнала с течением времени изменяются медленно. Это приводит к кратковременному анализу, в котором фрагменты выделяются и обрабатываются так, как если бы они были короткими участками отдельных звуков с отличающимися свойствами. На рис. 3,в представлен фрагмент вокализованного участка длительностью 100 мс. Длительность фрагмента в 100 мс определена эмпирически для повышения эффективности формантного анализа и декомпозиции.

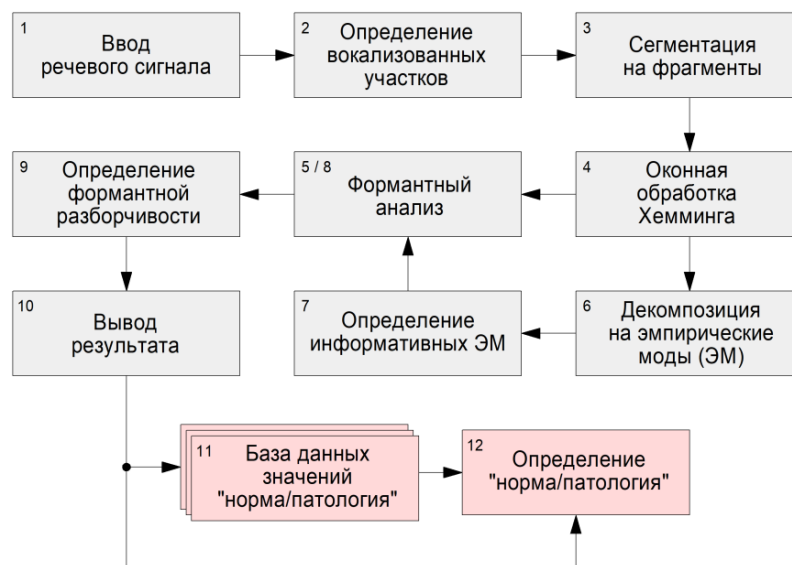


Рис. 2. Упрощенная блок-схема способа определения формантной разборчивости для оценки психоэмоционального состояния

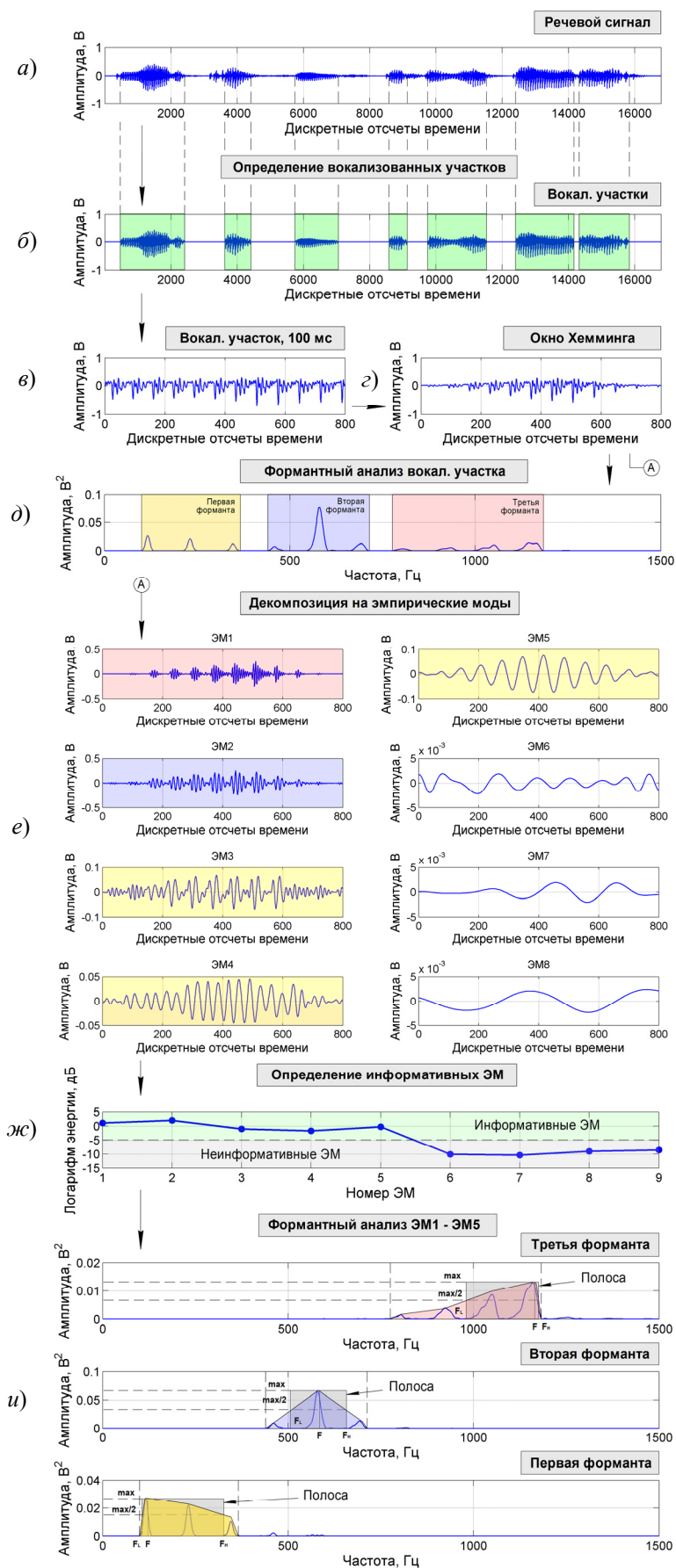


Рис. 3. Функционирование способа определения формантной разборчивости для оценки психоэмоционального состояния

Блок 4. Сегментация на фрагменты во временной области эквивалентна умножению сигнала на прямоугольное окно. В частотной области эквивалентно свертке. Из-за того, что передаточная функция прямоугольного окна имеет боковые лепестки, уровень которых достигает 20 %, спектр сигнала искажается (эффект Гиббса) [14]. Для уменьшения подобных искажений при обработке речевых сигналов применяются окна с плавно спадающими до нуля краями – окно Хемминга. На рис. 3,г представлен фрагмент вокализованного участка после оконной обработки.

Блок 5. Форматный анализ для задачи оценки психоэмоционального состояния человека представляет собой определение числовых значений частоты, ширины, уровня и добротности полосы формантных областей. Частота формантной области – F определяется как частотная составляющая, имеющая максимальный по амплитуде уровень. Ширина формантной области ΔF определяется как разность нижней F_L и верхней F_H частотной составляющей, на которых мощность спектральной огибающей снижается вдвое [15]. Добротность определяется как отношение частоты и ширины формантной области $Q = F/\Delta F$. На рис. 3,г представлен пример формантного анализа вокализованного участка. Для упрощения формы спектра формант строились с использованием прямых линий, соединяющих вершины частотных составляющих.

Блок 6. Важным условием адаптивного разложения речевого сигнала на равноартикуляционные полосы частот, является возможность формирования адаптивного базиса, функционально зависящего от структуры самого сигнала. Это условие выполняется в методе улучшенной ПМДЭМАШ, частотно-избирательные свойства которого обеспечивают адаптивность при разложении и позволяют учитывать внутренние особенности сигнала (скрытые модуляции, области концентрации энергии и т.п.).

Результат разложения приведен на рис. 3,е. Вокализованный участок речевого сигнала был разложен на 9 частотных составляющих – равноартикуляционных частотных диапазонов. Однако, для удобства отображения ЭМ9 не отображена на рис. 3,е.

Блок 7. Задача определения информативных ЭМ сводится к обнаружению частотных диапазонов, отражающих информацию о частотной локализации формантных областей. В основе определения заложен принцип выделения информативных мод имеющих большую энергию чем трендовые моды [2]. Амплитудное распределение ЭМ хорошо описывается с помощью функции кратковременной энергии. Для сжатия амплитуды сигнала в большом динамическом диапазоне применяется логарифмирование энергии, максимально приближая работу способа к работе слухового аппарата человека. На рис. 3,ж представлена зависимость логарифма энергии ЭМ от ее номера. Как видно из рис. 3,е и 3,ж наиболее информативными, отражающими информацию о частотной локализации формантных областей являются ЭМ1 – ЭМ5.

Блок 8. Иллюстрация результата формантного анализа для информативных ЭМ представлена на рис. 3,и. Локализации формантных областей:

- первая форманта – сумма ЭМ3, ЭМ4 и ЭМ5 (выделена желтым цветом);
- вторая форманта – ЭМ2 (выделена синим цветом);
- третья форманта – ЭМ1 (выделена красным цветом).

Блок 9. Формантная разборчивость речи представляет собой величину смещения частотной локализации формантных резонаторов вследствие патологий моторики речеобразующей системы. В реальных условиях определению формант будут мешать различные искажения, помехи и акустические шумы, создающие маскировку. Поэтому формантная разборчивость уменьшится и будет определяться по следующей формуле [15]:

$$\Delta A_s = \Delta A_{smax} P_s(E'),$$

где $P_s(E')$ – коэффициент, показывающий, какая часть формант в полосе будет воспринята в реальных условиях; E' – уровень восприятия формант.

Считая значения ΔA_s в смежных полосах спектра речи независимыми, получаем свойство аддитивности формант. Формантная разборчивость для всей полосы частот определяется по формуле

$$A = \sum_1 \Delta A_s = \sum_1 \Delta A_{smax} P_s(E').$$

При разложении с помощью улучшенной ПМДЭМАШ на пять равноартикуляционных частотных диапазонов при условии, что $\Delta A_{1\max} = \Delta A_{2\max} = \dots = 0,25$ и $\sum_{s=1}^5 \Delta A_{s\max} = 1$, формантная разборчивость

$$A = \frac{1}{5} \sum_{s=1}^5 P_s(E').$$

Уровень восприятия формант $E' = B'_p - b - B_{noise}$, где B'_p – уровень спектра формант; b – затухание при передаче речи; B_{noise} – спектральный уровень шума (с интегральным уровнем ощущения не менее 10дБ). Данные значения b взяты из работы [15].

Блок 10. Вывод результата заключается в формировании полученных значений формантной разборчивости, частоты, ширины, уровня и добротности полосы формантных областей в удобный для дальнейшего определения «норма/патология» вида. Это осуществляется посредством распространенного метода, используемого в приложениях по обработке речевых сигналов – смешанных гауссовских моделей (*Gaussian mixture model, GMM*) [16].

Исследование способа

Для тестирования предложенного способа сформирована группа исследуемых людей при поддержке центра психологической диагностики федерального казенного учреждения здравоохранения «Медицинская санитарная часть Министерства внутренних дел Российской Федерации по Пензенской области» (ЦПД ФКУЗ «МСЧ МВД РФ по Пензенской области»). Группа сформирована из наблюдаемых врачом-психиатром ЦПД ФКУЗ «МСЧ МВД РФ по Пензенской области» пациентов с эмоциональной нагрузкой, соответствующей 3-му классу по степени напряженности. В группу отобрано 53 человека мужского и женского пола, в возрасте от 18 до 79 лет. В том же количестве сформирована контрольная группа условно здоровых людей (без признаков психоэмоциональных расстройств и дефектов речи) из числа сотрудников и преподавателей Пензенского государственного университета.

В соответствии с разработанной авторами методикой была зарегистрирована база данных речевых сигналов. В подготовленном помещении с помощью специально настроенных параметров и расположения микрофона осуществлялась регистрация речи, воспроизводимой участниками обеих групп, при чтении трех видов текстового материала:

- фонетически сбалансированный текст публицистической статьи из газеты, состоящий из 100 слов;
- фонетически сбалансированный текст литературного произведения, состоящий из 100 слов;
- специально подобранные слова, составленные из них словосочетаний и предложения, включающие в себя звуки, максимально отражающие нарушения при воспроизведении речи.

Для оценки эффективности разработанного способа использовался параметр – ошибки первого и второго рода [16]. Анализируя значение формантной разборчивости, частоты, ширины, уровня и добротности полосы формантных областей, определялось наличие/отсутствие психоэмоционального расстройства. Ошибкой первого рода будет ложное присваивания статуса «норма» речевому сигналу, произнесенному человеком с эмоциональным расстройством, а ошибкой второго рода – ложное присваивание статуса «патология» речевому сигналу, произнесенному здоровым человеком. Исследование проводилось в два этапа: обучение и тестирование. Для определения ошибки первого рода обучение осуществлялось на группе здоровых людей и представляло собой формирование базы данных значений информативных параметров (формантной разборчивости, частоты, ширины, уровня и добротности полосы формантных областей), соответствующих статусу «норма». На этапе обучения также автоматически формируется пороговое значение статуса «норма» как среднее арифметическое значение данных информативных параметров. Тестирование на группе людей с психоэмоциональными расстройствами заключается в последовательном сравнении значений информативных параметров исследуемых речевых сигналов с пороговыми значениями.

Для определения ошибки второго рода последовательность действия исследования сохраняется, изменяются только группы. Обучение осуществляется на группе людей с психоэмоциональными расстройствами, а тестирование – на группе условно здоровых людей.

Все этапы обработки сигналов и анализа данных были выполнены в среде математического моделирования © *Matlab (MathWorks)*.

Исследование проводилось для трех видов речевых сигналов: слоги, слова и предложения. Сигналы длительностью не менее 100 мс были специально подготовлены с помощью аудиоредактора из зарегистрированной базы данных речевых сигналов. Для увеличения анализируемой информации слоги и слова в сигналах повторялись несколько раз (30 раз минимум). В табл. 1 представлены результаты определения психоэмоциональных расстройств.

Таблица 1

Результаты определения психоэмоционального расстройства

Прогнозируемый результат	Результат обнаружения		Ошибки первого и второго рода, %	
	Патология	Норма		
Слоги				
Патология	31 чел.	22 чел.	1st, α	41,5
Норма	13 чел.	40 чел.	2nd, β	24,52
Слова				
Патология	35 чел.	18 чел.	1st, α	33,96
Норма	9 чел.	44 чел.	2nd, β	16,98
Предложения				
Патология	49 чел.	4 чел.	1st, α	8,16
Норма	3 чел.	50 чел.	2nd, β	5,66

Результаты исследования и выводы

В сравнении между тремя видами сигналов наименьшее количество ошибок первого и второго родов ($\alpha = 8,16\%$, $\beta = 5,66\%$) достигается при анализе предложений. Объясняется это большим количеством анализируемой информации о формантной разборчивости, частоте, ширине, уровне и добротности полос формантных областей вокализованных участков в предложениях. Худшие результаты наблюдаются в анализе более коротких сигналов: слоги $\alpha = 41,5\%$, $\beta = 24,52\%$ и слова $\alpha = 33,96\%$, $\beta = 16,98\%$, которые никак не применимы в реальной практике.

В соответствии с результатами исследований можно сделать выводы:

- психоэмоциональные расстройства человека достаточно серьезно влияют на вокализованные характеристики речевого тракта;
- значения формантной разборчивости, частоты, ширины, уровня и добротности полосы формантных областей вокализованных участков анализируемых сигналов достаточно полно отображают нарушения работы артикуляционного отдела речевого тракта;
- предложенный способ обеспечивает точное определение психоэмоционального расстройства при анализе более длительных сигналов;
- разработанный способ на основе улучшенной ПМДЭМАШ и формантного анализа предварительно может тестироваться на реальных речевых сигналах, зарегистрированных у операторов систем управления с высокой степенью ответственности для оценки их психоэмоционального состояния.

Библиографический список

1. Здравоохранение в России 2017. Статистический сборник. – URL: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/zdrav17.pdf. (дата обращения: 20.06.2019).
2. Improved CEEMDAN based speech signal analysis algorithm for mental disorders diagnostic system. Pitch frequency detection and measurement / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, A. V. Kuzmin, P. P. Churakov, A. V. Ageykin, G. V. Vishnevskaya // International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS). – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 22–47.
3. Schuller, B. W. Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing / B. W. Schuller, A. M. Batliner. – New York : Wiley, 2013. – P. 344.

4. Официальный сайт компании «WEVOSYS». – URL: <http://www.wevosys.com> (дата обращения: 20.06.2019).
5. Официальный сайт компании «NEMESYSKO». – URL: <http://www.nemesysco.com> (дата обращения: 20.06.2019).
6. Alimuradov, A. K. A method to determine cepstral markers of speech signals under psychogenic disorders / A. K. Alimuradov, A. Yu. Tychkov, A. V. Ageykin, P. P. Churakov // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Yekaterinburg, Russia, 7–8 May 2018). – Yekaterinburg, Russia : IEEE, 2018. – P. 128–131.
7. Schwartz, T. L. Depression: Treatment Strategies and Management (Medical Psychiatry Series) / T. L. Schwartz and T. J. Petersen. – Boca Raton : Informa Healthcare, 2009. – 339 p.
8. Williamson, J. R. Vocal and facial biomarkers of depression based on motor incoordination and timing / J. R. Williamson, Th. F. Quatieri, B. S. Helfer, G. Ciccarelli, D. D. Mehta // 4th International Workshop on Audio/Visual Emotional Challenge (AVEC) (Orlando, USA, 3–7 November 2014). – Orlando, USA : New York, NY ACM, 2014. – P. 65–72.
9. Фант, Г. К. Акустическая теория речеобразования / Г. К. Фант ; пер. с англ. Л. А. Варшавского и В. И. Медведева ; науч. ред. В. С. Григорьева. – Москва : Наука, 1964. – 284 с.
10. Colominasa M. A. Improved complete ensemble EMD: a suitable tool for biomedical signal processing / M. A. Colominasa, G. Schlotthauer, M. E. Torres // Biomed. Signal Proces. – 2014. – Vol. 14. – P. 19–29.
11. Stassi, A. E. Vocal fold activity detection from speech related biomedical signals: a preliminary study / A. E. Stassi, G. A. Alzamendi, G. Schlotthauer, M. E. Torres // VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014 (Parana, Argentina, 29 – 31 October 2014). IFMBE Proceedings. – Springer, 2014. – Vol. 49. – P. 520–523.
12. Torres, M. E. Empirical mode decomposition. Spectral properties in normal and pathological voices / M. E. Torres, G. Schlotthauer, H. L. Rufiner, M. C. Jackson-Menaldi // 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, ECIFMBE. (Antwerp, Belgium, 23–27 November 2008). – Antwerp, Belgium : Springer, 2008. – P. 252–255.
13. Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Sh. Zheng, R. L. Steven // Proceedings of the Royal Society of London. – 1998. – A 454. – P. 903–995.
14. Афонский, А. А. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики / А. А. Афонский, В. П. Дьяконов. – Москва : Солон-Пресс, 2005. – 576 с.
15. Михайлов, В. Г. Измерение параметров речи / В. Г. Михайлов, Л. В. Златоусова ; под ред. М. А. Сапожникова. – Москва : Радио и связь, 1987. – 168 с.
16. Huang, X. Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Developmen / X. Huang, A. Acero, H.-W. Hon. – New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 980 p.

References

1. Zdravookhranenie v Rossii 2017. Statisticheskii sbornik [Healthcare in Russia 2017. Statistical compendium]. Available at: http://www.gks.ru/free_doc/doc_2017/zdrav17.pdf. (accessed Jun. 20, 2019). [In Russian]
2. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Kuzmin A. V., Churakov P. P., Ageykin A. V., Vishnevskaya G. V. *International Journal of Embedded and Real-Time Communication Systems (IJERTCS)*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 22–47.
3. Schuller B. W., Batliner A. M. *Computational Paralinguistics: Emotion, Affect and Personality in Speech and Language Processing*. New York: Wiley, 2013, p. 344.
4. *Ofitsial'nyy sayt kompanii «WEVOSYS»* [Official website of "WEVOSYS"]. Available at: <http://www.wevosys.com> (accessed Jun. 20, 2019).
5. *Ofitsial'nyy sayt kompanii «NEMESYSKO»* [Official website of NEMESYSKO]. Available at: <http://www.nemesysco.com> (accessed Jun. 20, 2019).
6. Alimuradov A. K., Tychkov A. Yu., Ageykin A. V., Churakov P. P. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT) (Yekaterinburg, Russia, 7–8 May 2018)*. Yekaterinburg, Russia: IEEE, 2018, pp. 128–131.
7. Schwartz T. L., Petersen T. J. *Depression: Treatment Strategies and Management (Medical Psychiatry Series)*. Boca Raton: Informa Healthcare, 2009, 339 p.
8. Williamson J. R., Quatieri Th. F., Helfer B. S., Ciccarelli G., Mehta D. D. *4th International Workshop on Audio/Visual Emotional Challenge (AVEC) (Orlando, USA, 3–7 November 2014)*. Orlando, USA: New York, NY ACM, 2014, pp. 65–72.
9. Fant G. K. *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya* [Acoustic theory of speech formation]; transl. from Engl. L. A. Varshavskiy and V. I. Medvedev. Moscow: Nauka, 1964, 284 p. [In Russian]
10. Colominasa M. A., Schlotthauer G., Torres M. E. *Biomed. Signal Proces.* 2014, vol. 14, pp. 19–29.

11. Stassi A. E., Alzamendi G. A., Schlotthauer G., Torres M. E. *VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014 (Parana, Argentina, 29 – 31 October 2014). IFMBE Proceedings*. Springer, 2014, vol. 49, pp. 520–523.
12. Torres M. E., Schlotthauer G., Rufiner H. L., Jackson-Menaldi M. C. *4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering, ECIFMBE. (Antwerp, Belgium, 23–27 November 2008)*. Antwerp, Belgium: Springer, 2008, pp. 252–255.
13. Huang N. E., Zheng Sh., Steven R. L. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1998, A 454, pp. 903–995.
14. Afonskiy A. A., Dyakonov V. P. *Tsifrovye analizatory spektra, signalov i logiki* [Digital spectrum, signal and logic analyzers]. Moscow: Solon-Press, 2005, 576 p. [In Russian]
15. Mikhaylov V. G., Zlatousova L. V. *Izmerenie parametrov rechi* [Measurement of parameters of speech]. Moscow: Radio i svyaz', 1987, 168 p. [In Russian]
16. Huang X., Acero A., Hon H.-W. *Spoken Language Processing. Guide to Algorithms and System Development*. New Jersey: Prentice Hall, 2001, 980 p.

Алимурадов Алан Казанферович

кандидат технических наук,
директор студенческого научно-производственного
бизнес-инкубатора,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alimuradov Alan Kazanferovich

candidate of technical sciences,
director of student research and production business
incubator,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Тычков Александр Юрьевич

кандидат технических наук, заместитель директора
научно-исследовательского института
фундаментальных и прикладных исследований,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tychkov-a@mail.ru

Tychkov Aleksandr Yur'evich

candidate of technical sciences,
deputy director at the Research Institute
for Basic and Applied Studies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: churakov-pp@mail.ru

Churakov Petr Pavlovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Султанов Борис Владимирович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационной безопасности систем
и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ibst@pnzgu.ru

Sultanov Boris Vladimirovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information security systems
and technologies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Алимурадов, А. К. Способ определения формантной разборчивости речи для оценки психоэмоционального состояния операторов систем управления с высокой степенью ответственности / А. К. Алимурадов, А. Ю. Тычков, П. П. Чураков, Б. В. Султанов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 58–69. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-7.

О. Н. Бодин, Г. А. Солодимова, А. Н. Спиркин

НЕЙРОИНТЕРФЕЙС ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

O. N. Bodin, G. A. Solodimova, A. N. Spirkin

NEUROINTERFACE FOR CONTROLLING ROBOTIC DEVICES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являются нейроинтерфейсы, предназначенные для управления роботизированными устройствами с помощью сигналов мозговой активности. Предметом исследования являются методы и алгоритмы распознавания ЭЭГ-паттернов, соответствующих образу воображаемой испытуемым моторной команды. Целью работы является разработка программно-аппаратного комплекса для управления роботизированными механизмами, позволяющего распознавать ЭЭГ-паттерны двигательной активности и адаптироваться под конкретного оператора. **Материалы и методы.** Для решения поставленных задач в работе использовались методы обработки временных рядов и создания искусственных нейронных сетей. **Результаты.** Предложено устройство, реализованное на платформе аналого-цифрового регистратора типа Arduino Mega 2560. Устройство позволяет распознавать ЭЭГ-сигналы мозговой активности и вырабатывать сигналы для управления роботизированными механизмами типа бионические протезы, роботизированные инвалидные коляски, экзоскелеты. **Выводы.** Использование предложенного устройства позволит людям, страдающим серьезными нарушениями двигательной системы, улучшить качество своей жизни.

A b s t r a c t. Background. The object of the study is the neural interfaces that control robotic devices using signals of brain origin recorded by electroencephalography. The subject of the study is the methods and algorithms for recognizing EEG patterns corresponding to the image of an imaginary motor team subject. The aim of the work is to develop a software and hardware complex for controlling robotic mechanisms, which allows to recognize EEG patterns of motor activity and adapt to a specific operator. **Materials and methods.** To solve the tasks in the work, methods of processing time series and creating artificial neural networks were used. **Results.** A device is proposed that is implemented on the platform of an analog-to-digital recorder such as Arduino Mega 2560. The device allows you to recognize EEG signals of brain activity and generate signals for controlling robotic mechanisms such as bionic prostheses, robotic wheelchairs, exoskeletons. **Conclusions.** Using the proposed device will allow people suffering from serious disorders of the motor system to improve their quality of life.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нейроинтерфейс, ритмы мозговой активности, электроэнцефалограмма, ЭЭГ-паттерн, искусственная нейронная сеть.

Key words: neurointerface, rhythms of brain activity, electroencephalogram, EEG pattern, artificial neural.

Введение

Последнее десятилетие XX в. прошло под знаком стремительного развития информационных технологий, давших в распоряжение ученых высокоскоростные компьютеры с большой памятью. Прогресс в области цифровой обработки сигналов и статистического анализа, а так-

же новые теоретические знания о нейронных сетях открыли перед научными коллективами перспективу практической реализации различного рода нейроинтерфейсов. Нейроинтерфейс или интерфейс «мозг – компьютер» (ИМК) представляет собой систему для управления компьютером или подключенными к нему устройствами с помощью сигналов мозгового происхождения [1, 2]. В настоящее время ИМК становится популярным устройством, широко используемым в современной робототехнике, позволяющим человеку воздействовать на окружающую среду усилием мысли через расшифровку мысленных команд по сигналам в электроэнцефалограмме (ЭЭГ) или другим методам записи активности мозга. Большая часть работы над современным ИМК направлена на улучшение качества жизни людей, страдающих от серьезных нарушений двигательной системы. Широко ведутся работы [3] по встраиванию ИМК в роботизированные инвалидные кресла; роботизированные протезы; экзоскелеты. Но ИМК может использоваться и здоровыми людьми в таких областях, как управление роботизированными устройствами (например, автомобилем или беспилотными летательными аппаратами); игры, тренажеры виртуальной реальности.

Материалы и методы

Принцип работы ИМК заключается в следующем. При намерении совершить какое-либо действие у пользователя повышается электрическая активность соответствующих зон головного мозга. Эти сигналы регистрируются, усиливаются, оцифровываются и в виде цифровых данных поступают в компьютер, где производится вычисление признаков сигнала, характерных для того или иного мысленного желания. Далее набор признаков разделяют по типам, и компьютер вырабатывает команду, управляющую исполнительным устройством (компьютерной программой, инвалидной коляской, протезом и пр.). Пользователь в режиме реального времени наблюдает за реакцией системы на свое мысленное действие. Архитектура ИМК представлена на рис. 1.

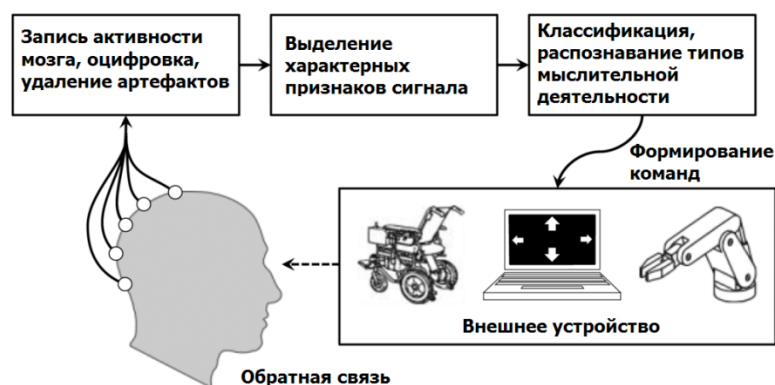


Рис. 1. Архитектура ИМК

Регистрация сигналов мозговой активности (биопотенциалов) может осуществляться как инвазивным, так и неинвазивным способами [4]. Если биопотенциалы снимаются с поверхности головы, то ИМК называются неинвазивными. При регистрации биопотенциалов с коры головного мозга (ЭКоГ) или с отдельных нейронов в глубинных структурах ИМК являются инвазивными (рис. 2). Несмотря на то, что *инвазивные* методы ИМК обладают большей точностью распознавания, их применение сильно ограничено необходимостью проведения сложной хирургической операции, а также проблемами, связанными с постепенным зарастанием электродов соединительными тканями. Это приводит со временем к значительному ухудшению электрического контакта с мозгом, с полным его нарушением впоследствии. В связи с данными обстоятельствами наибольшее развитие получили ИМК неинвазивного типа.

В большинстве работ по энцефалографии для всех испытуемых сигнал ЭЭГ анализируется в классических частотных диапазонах, заимствованных из клинической практики: дельта-ритм (1–4 Гц); тета-ритм (4–8 Гц); альфа-ритм (8–14 Гц); бета-ритм (14–30 Гц); гамма-ритм (30–50 Гц) и т.д. [6]. Под ритмом принято понимать изменение сигнала ЭЭГ в определенном диапазоне частот. Уменьшение амплитуды ЭЭГ без изменения их частотной характеристики

называют депрессией ритма. Процесс, выражающийся в формировании регулярной, упорядоченной ритмической активности и увеличении амплитуды колебаний, называют синхронизацией ритма. Нарушение ритмичности протекания волновых процессов ЭЭГ, появление менее регулярных с меньшей амплитудой колебаний называют десинхронизацией ритма.

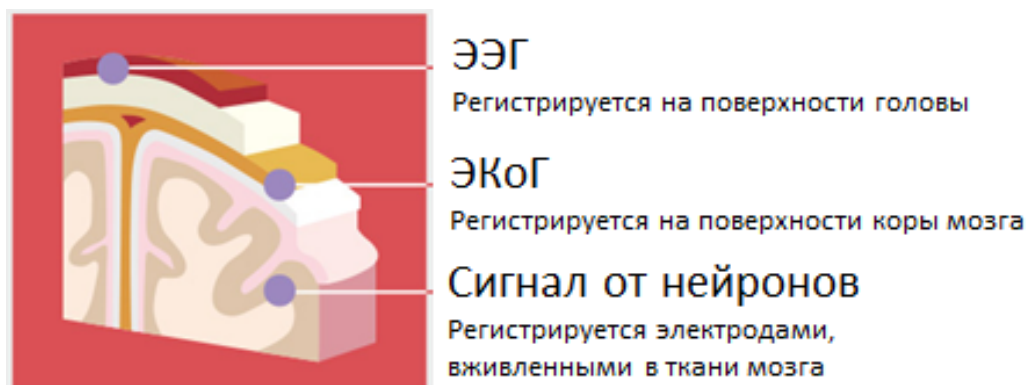


Рис. 2. Инвазивные и неинвазивные способы регистрации активности мозга

Установлено [6, 7], что наиболее четко в ЭЭГ-сигналах наблюдается альфа-ритм, для него характерна амплитуда сигнала 60–80 мкВ и он регистрируется у людей в состоянии бодрствования в теменно-затылочных областях мозга, отвечающих за сенсорную и зрительную функцию. В области двигательного центра коры головного мозга регистрируются колебания, соответствующие частоте альфа-ритма, но имеющие характерную аркообразную форму. При выполнении движений или их мысленном представлении у человека происходит десинхронизация мю-ритма, т.е. возникают так называемые ЭЭГ-паттерны – временные интервалы уменьшения амплитуды биопотенциала.

Из ЭЭГ-паттернов посредством различных классификаторов (методы линейной дискриминации, опорных векторов, байесовские классификаторы, искусственные нейронные сети и др. [8]) могут быть выделены значимые образы. Как правило, каждому каналу (отведению) в записи ЭЭГ сопоставляется несколько характерных признаков. При этом, чем больше общее число признаков, тем больше примеров требуется для корректного обучения классификатора. Однако на практике получение больших выборок обучающих данных бывает затруднено. В связи с этим отбор информативных признаков является важной операцией, позволяющей выделить признаки, несущие не «шум», а полезную для данной задачи информацию.

Результаты

Авторами были проведены исследования мозговой активности методами ЭЭГ. При регистрации ЭЭГ использовалась система «10–20 %» – стандартная система размещения электродов на поверхности головы, которая рекомендована Международной федерацией электроэнцефалографии и клинической нейрофизиологии [5]. Всего по данной схеме на поверхность головы накладывают 21 электрод (рис. 3). Было установлено, что основная мозговая активность, связанная с крупной моторикой (движением рук и ног), находится в диапазоне от 7 до 30 Гц, а амплитуда сигнала не превышала 80 мкВ. Были определены основные помехи, к которым относились помехи, вызванные движением глаз, электродов и мышц. Они располагались в области более низких частот – от 0,1 до 6 Гц, поэтому необходимо проводить фильтрацию сигналов. Было принято решение использовать сигналы только с восьми активных (АЭ1–АЭ8) и одного пассивного электрода (ПЭ) и использовалось монополярное отведение, при этом активные электроды располагались в зонах, отвечающих за двигательную активность (центральная и теменная области мозга), а пассивный электрод прикреплялся к мочке уха испытуемого (на рис. 3 используемые электроды выделены темным цветом). Объем информации, получаемого с этих электродов, было вполне достаточно для распознавания большинства значимых образов: включение/выключение устройств, управление курсором, моделью машины, рукой-протезом.

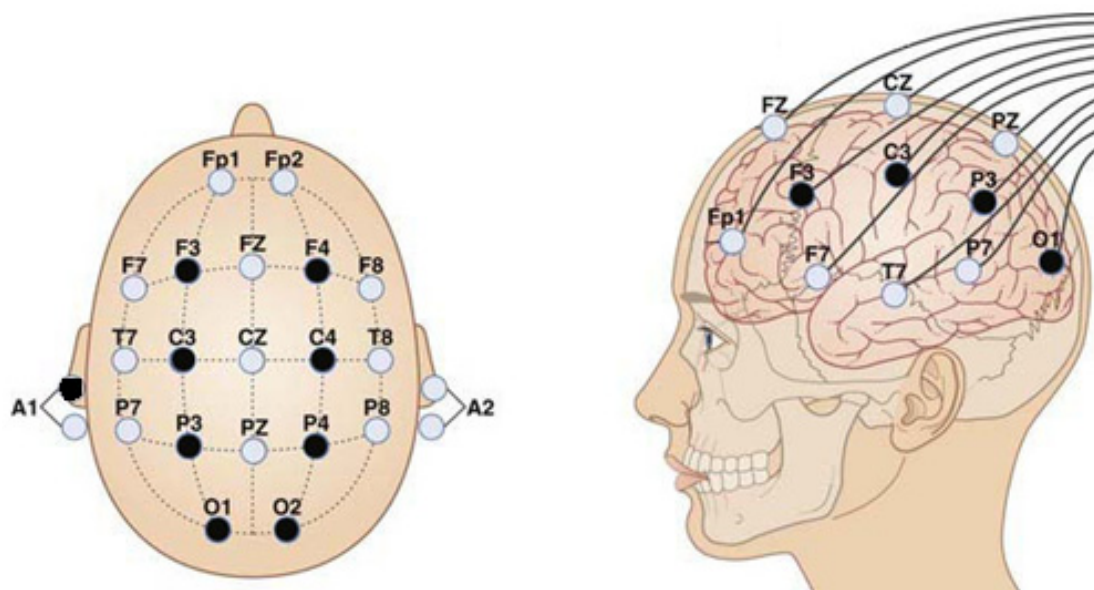


Рис. 3. Схема расположения электродов

Авторами было создано устройство контроля параметров мозговой активности, которое может использоваться в виде прототипа ИМК. Структурная схема разработанного устройства приведена на рис. 4. В состав устройства входит два блока – блок обработки соответственно аналогового и цифрового сигнала.

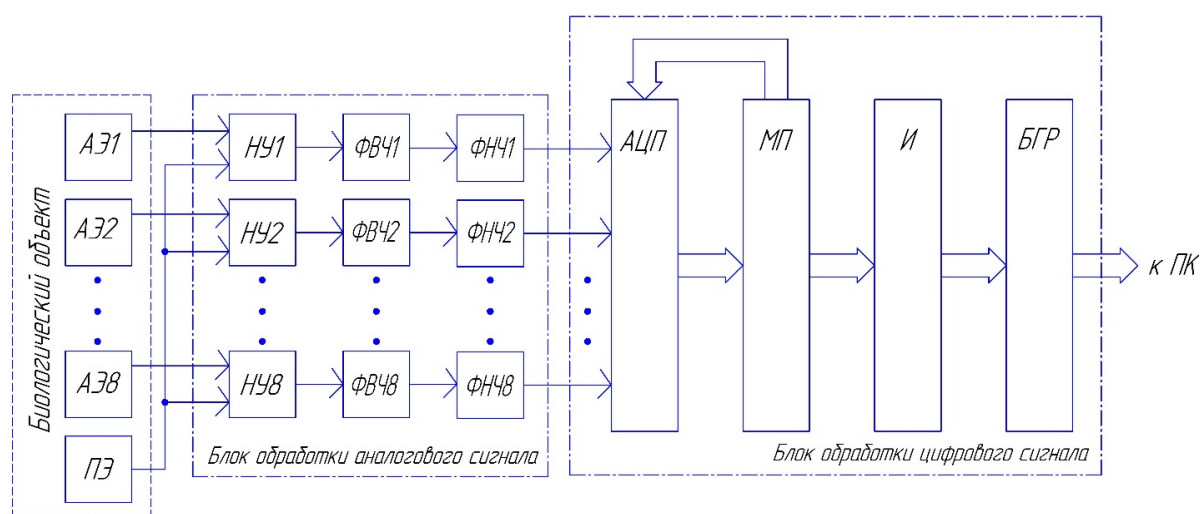


Рис. 4. Структурная схема устройства контроля параметров мозговой активности

ЭЭГ-сигналы поступают в блок обработки аналогового сигнала, где усиливаются нормирующими усилителями (НУ1–НУ8), фильтруются с помощью фильтров верхних (ФВЧ1–ФВЧ8) и нижних (ФНЧ1–ФНЧ8) частот. Нормирующие усилители собраны на инструментальных усилителях типа INA321. Фильтры реализованы на многоканальных усилителях типа MCP 6004, полоса пропускания фильтров лежит в диапазоне от 6 до 30 Гц.

Выходные сигналы блока обработки аналоговых сигналов поступают в блок обработки цифровых сигналов, реализованный на основе аналого-цифрового регистратора типа Arduino. Выбор данного типа регистратора продиктован наличием в нем узлов для управления роботизированными механизмами и точностью регистрации аналоговых сигналов до 0,1 %, что достаточно для решения поставленной задачи распознавания ЭЭГ-сигналов. Основным узлом регистратора является 8-битный микроконтроллер семейства AVR – ATmega2560 с тактовой частотой 16 МГц, энергонезависимой памятью (EEPROM) до 256 кБайт и оперативной памятью (SRAM) до 4кБайт. Микроконтроллер имеет встроенный многоканальный (с 16 аналого-

выми входами) 10-разрядный АЦП последовательного приближения, который может работать как с внутренним, так и внешним опорным напряжением.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных данных, полученных с помощью используемых ЭЭГ – электродов.

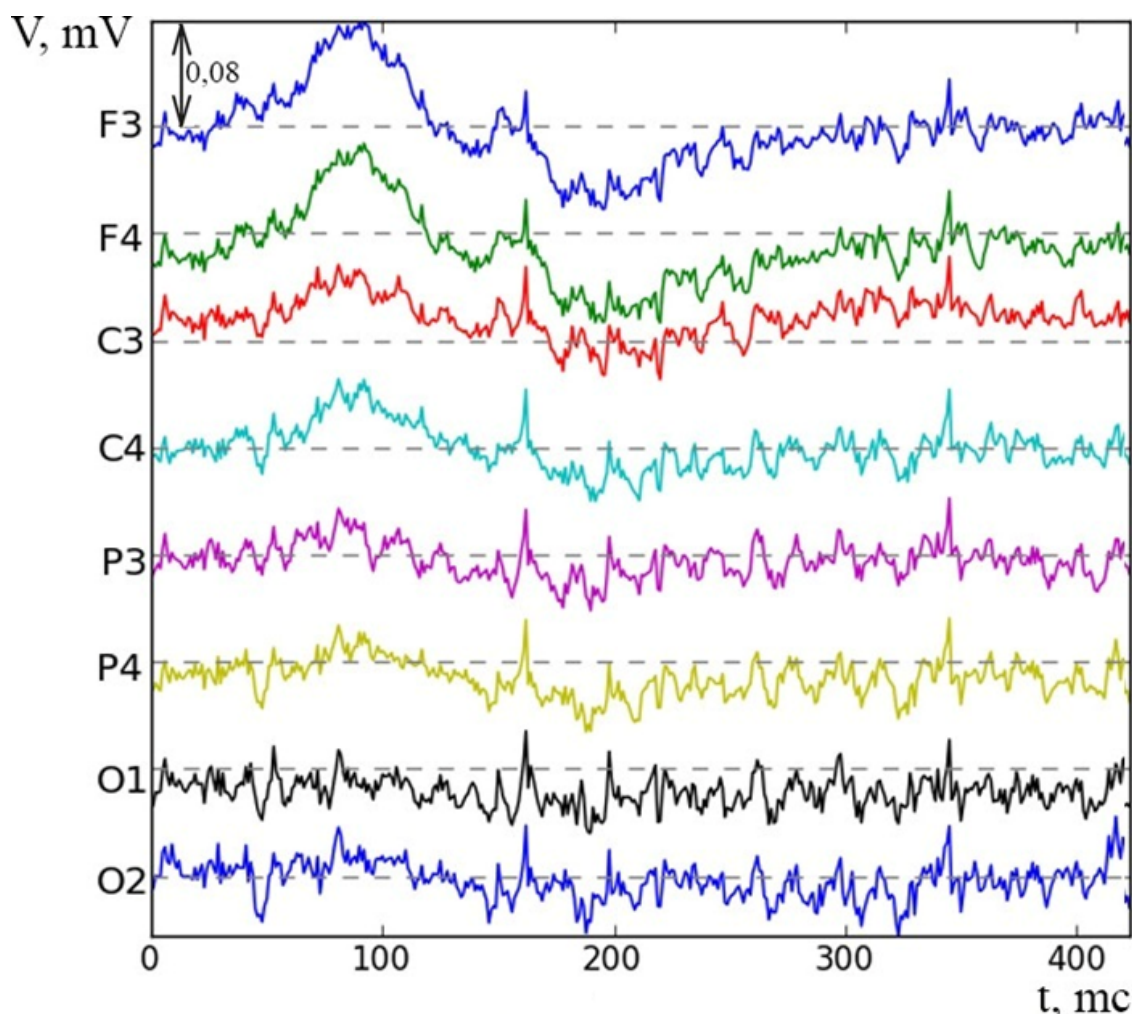


Рис. 5. Экспериментальные данные ЭЭГ

Оцифрованные данные с регистратора подавались на ноутбук с установленным на нем специализированным программным обеспечением (ПО), использующим искусственную нейронную сеть Кохонена [9] для распознавания ЭЭГ-паттернов. Выбор типа сети обусловлен тем, что она предназначена для поиска закономерностей в больших массивах данных, тем самым позволяет произвести классификацию мысленных команд пользователя.

Выборка ЭЭГ сигналов была сформирована на основе показаний пяти человек. Для анализа выбирался фрагмент записи ЭЭГ-сигнала длительностью 30 с. При формировании входа нейронной сети составлялась матрица из числа строк, равных количеству сигналов 8 и количества столбцов, равного числу отсчетов в соответствии с выбранной частотой дискретизации (500 Гц) и временем регистрации (30 с). Для выявления ЭЭГ-паттерна строки матрицы были разбиты на временные отрезки с длительностью по 2 с. Так как частота дискретизации равна 500 Гц, соответственно, длина каждого отрезка составляла 1000 элементов, следовательно, общее количество отрезков равнялось 15. В каждом временном отрезке проверялось наличие ЭЭГ-паттерна с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. Значение максимальной амплитуды сравнивалось с пороговым значением, если значение амплитуды превышало порог, значит, ЭЭГ-паттерн присутствовал, и в новую матрицу информационных признаков записывалась 1, в обратном случае – 0.

После обработки всех данных с помощью нейронной сети для каждого пациента был создан вектор из 15 значений. Совокупность полученных векторов представляла собой обучающее множество для нейронной сети. Нейронная сеть, обучившись на множестве паттернов для каждого класса образов мысленных команд пользователя, сможет корректно отличать их друг от друга. ИМК будет выполнять распознавание ЭЭГ-сигналов посредством обученного на паттернах классификатора, после чего вырабатывать управляющие воздействия для роботизированного устройства.

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность реализации нейроинтерфейсов на основе аналого-цифрового регистратора типа Arduino, широко используемого в робототехнике, а использование выбранной искусственной нейронной сети дает возможность распознавания ЭЭГ-паттерна мысленной команды пользователя с достаточной степенью достоверности.

Библиографический список

1. *Larsen, E. A. Classification of EEG Signals in a Brain-Computer Interface System* / E. A. Larsen // Master's Thesis of Science in Computer Science. – 2011. – 58 p.
2. *Yang, J. S. Wireless brain-computer interface for electric wheelchairs with EEG and eye-blinking signals* / J. S. Yang // *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control.* – 2012. – Т. 8. – Р. 611–624.
3. *Каплан, А. Я. Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации* / А. Я. Каплан // *Физиология человека.* – 2016. – № 42 (1). – С. 118–127.
4. *Боброва, Е. В. Методы и подходы для оптимизации управления системой «интерфейс мозг-компьютер» здоровыми испытуемыми и пациентами с нарушениями движений* / Е. В. Боброва, А. А. Фролов, В. В. Решетникова // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова.* – 2017. – № 4. – С. 377–393.
5. Экспериментально-теоретические основания и практические реализации технологии «интерфейс мозг-компьютер» / А. Я. Каплан, А. Г. Кочетова, С. Л. Шишкин, И. А. Басюл, И. П. Ганин, А. Н. Васильев, С. П. Либуркина // *Бюллетень сибирской медицины.* – 2013. – № 12 (2). – С. 21–29.
6. *Леонова, А. Б. Психологические технологии управления состоянием человека* / А. Б. Леонова, А. С. Кузнецова. – Москва : Смысл, 2015. – 380 с.
7. *Мокиенко, О. А. Воображение движения и его практическое применение* / О. А. Мокиенко, Л. А. Черникова, А. А. Фролов, П. Д. Бобров // *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова.* – 2013. – № 63 (2). – С. 195–204.
8. *Фролов, А. А. Принципы нейрореабилитации, основанные на использовании интерфейса «мозг-компьютер» и биологически адекватного управления экзоскелетом* / А. А. Фролов, Е. В. Бирюкова, П. Д. Бобров, О. А. Мокиенко // *Физиология человека.* – 2013. – № 39 (2). – С. 99–113.
9. *Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения* / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко. – Харьков : Телетех, 2004. – 369 с.

References

1. *Larsen E. A. Master's Thesis of Science in Computer Science.* 2011, 58 p.
2. *Yang J. S. Int. J. Innov. Comput. Inf. Control.* 2012, vol. 8, pp. 611–624.
3. *Kaplan A. Ya. Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 2016, no. 42 (1), pp. 118–127. [In Russian]
4. *Bobrova E. V., Frolov A. A., Reshetnikova V. V. Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I. P. Pavlova* [Journal of higher nervous activity I. P. Pavlova]. 2017, no. 4, pp. 377–393. [In Russian]
5. *Kaplan A. Ya., Kochetova A. G., Shishkin S. L., Basyul I. A., Ganin I. P., Vasil'ev A. N., Liburkina S. P. Byulleten' sibirskoy meditsiny* [Bulletin of Siberian medicine]. 2013, no. 12 (2), pp. 21–29. [In Russian]
6. *Leonova A. B., Kuznetsova A. S. Psikhologicheskie tekhnologii upravleniya sostoyaniem cheloveka* [Psychological technologies for managing the human condition]. Moscow: Smysl, 2015, 380 p. [In Russian]
7. *Mokienko O. A., Chernikova L. A., Frolov A. A., Bobrov P. D. Zhurnal vysshey nervnoy deyatel'nosti im. I. P. Pavlova* [Journal of higher nervous activity I. P. Pavlova]. 2013, no. 63 (2), pp. 195–204. [In Russian]
8. *Frolov A. A., Biryukova E. V., Bobrov P. D., Mokienko O. A. Fiziologiya cheloveka* [Human physiology]. 2013, no. 39 (2), pp. 99–113. [In Russian]
9. *Bodyanskiy E. V., Rudenko O. G. Iskustvennye neyronnye seti: arkhitektury, obuchenie, primeneniya* [Artificial neural networks: architectures, training, applications]. Kharkov: Teletekh, 2004, 369 p. [In Russian]

Бодин Олег Николаевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Солодимова Галина Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: solodimova@mail.ru

Спиркин Андрей Николаевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Spirkin.andre@yandex.ru

Bodin Oleg Nikolaevich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Solodimova Galina Anatolyevna

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of information-measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Spirkin Andrei Nikolaevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Бодин, О. Н. Нейроинтерфейс для управления роботизированными устройствами / О. Н. Бодин,
Г. А. Солодимова, А. Н. Спиркин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. –
№ 4 (30). – С. 70–76. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-8.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 531.787.084.2.002.5

DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-9

И. В. Макаров, А. В. Перелыгина, Н. С. Чапанов, В. А. Шокоров

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА МОНОСУЛЬФИДА САМАРИЯ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

I. V. Makarov, A. V. PereLygina, N. S. Chaparov, V. A. Shokorov

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL TREATMENT ON THE PROPERTIES OF SAMARIUM MONOSULFIDE IN THE PROCESS OF MANUFACTURING PRESSURE SENSOR CRYSTALS

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Предметом исследований является полупроводниковый чувствительный слой моносulfида самария (SmS) на кремниевой подложке. Целью работы является отработка технологии формирования приборного слоя на поверхности чувствительного элемента комбинированным методом, а также исследование влияния на состав нанесенного слоя SmS формирования нитрида кремния, травления SmS и формирования металлизации. **Материалы и методы.** В качестве теоретического метода исследования использовался: анализ научно-технической литературы по определению метода формирования приборного слоя, в качестве эмпирического – эксперимент, в котором определялся химический состав сформированного на кремниевой подложке SmS после воздействия химической обработки. **Результаты.** Определены оптимальные химические реагенты, применяемые материалы и режимы проведения фотолитографии, обеспечивающие сохранение химического состава SmS при формировании приборного слоя. **Выводы.** Предложенная технология формирования приборного слоя из SmS позволит повысить температурный диапазон измерения давления, чувствительность и линейность выходного сигнала, а также радиационную стойкость датчиков давления за счет применения более широкозонного материала.

A b s t r a c t. Background. The subject of research is a semiconductor sensitive layer of samarium monosulfide on a silicon substrate. The aim of the work is to develop a technology for the formation of an instrument layer on the surface of a sensitive element by a combined method and study of the effect on the composition of the applied SmS layer of the formation of silicon nitride, etching of SmS and the formation of metallization. **Materials and methods.** As research methods were used: analysis of scientific and technical literature to determine the method of forming the instrument layer as well as experiment in which the chemical composition of SmS formed on a silicon substrate was determined after exposure to chemical treatment. **Results.** In the course of the research, the optimal chemical reagents, the materials used and the

photolithography modes that ensure the preservation of the chemical composition of SmS during the formation of the instrument layer were determined. Findings. The technology proposed by the authors for the formation of the instrument layer from SmS will increase the temperature range of pressure measurement, sensitivity and linearity of the output signal, as well as radiation resistance of pressure sensors through the use of a wider-band material.

К л ю ч е в ы е с л о в а: моносulfид самария, приборный слой, технология формирования, химический состав, фотолитография, методы травления, датчик давления.

Key words: samarium monosulfide, instrument layer, formation technology, chemical composition, photolithography, etching methods, pressure meter.

Введение

Разработке и совершенствованию полупроводниковых датчиков давления уделяется большое внимание в нашей стране и за рубежом, что находит подтверждение в большом количестве научно-технических и патентных публикаций. Тем не менее остается немало нерешенных или требующих дальнейшего развития вопросов, связанных с их совершенствованием.

Повышение тактико-технических характеристик существующих датчиков давления является актуальной проблемой как с научной, так и с практической точек зрения. Наиболее распространенным явлением оказывается повышение температурного диапазона измерения давления, чувствительности и линейности выходного сигнала, а также радиационной стойкости, за счет применения более широкозонных материалов в качестве приборного слоя датчика. Новейшими среди таких материалов являются редкоземельные полупроводники и, в частности, моносulfид самария (SmS) [1, 2].

SmS как в чистом виде, так и легированный другими редкоземельными элементами, благодаря совокупности уникальных свойств обладает большим коэффициентом тензочувствительности, сравнимым с монокристаллическим кремнием (Si), и минимальным температурным коэффициентом сопротивления, в 3 раза меньшим по сравнению с Si [1, 2].

В связи с этим формирование SmS в качестве приборного слоя на полупроводниковом чувствительном элементе датчика давления с сохранением стехиометрии состава поверхности пленки является перспективной задачей, а анализ экспериментальных данных по формированию SmS является целью данной статьи.

Анализ основных методов формирования приборного слоя

При выборе оптимальной технологии формирования приборного слоя из SmS следует руководствоваться как точным воспроизведением рисунка схемы, так и минимизацией воздействия химреактивов на тонкопленочную структуру.

Опыт в разработке технологии формирования датчиков давления позволяет сделать выбор между тремя вариантами технологии:

- метод свободных масок;
- метод прямой фотолитографии;
- комбинированный метод.

Метод свободных масок исключает воздействие химреактивов на формируемые элементы схемы, но обладает меньшей точностью воспроизведения рисунка топологии и требует больших затрат на изготовление высокоточной и сложной технологической оснастки из нержавеющей стали [3].

Метод прямой фотолитографии отличается высокой точностью формирования элементов тензосхемы и совмещаемостью слоев, но формируемые элементы тензосхемы подвергаются воздействию сильнодействующих химических реактивов, что отрицательно сказывается в дальнейшем на временной стабильности параметров датчика.

Комбинированный метод предполагает формирование контактных площадок тензорезисторов методом свободных масок, а конфигурации тензорезисторов – способ прямой фотолитографии. Если использовать в качестве метода травления тонкой резистивной пленки технологию ионного или ионно-химического травления, то исключается воздействие сильнодействующих химических реактивов на элементы тензосхемы.

Использование комбинированного метода формирования тензосхемы с применением плазмохимического, ионного или жидкостного травления тонкой резистивной пленки позволяет получить высокую точность воспроизведения топологии тензосхемы и обеспечивает долговременную стабильность параметров датчика [4].

Способ плазмохимического травления обладает селективностью, равномерностью и скоростью, сравнимыми с жидкостным химическим травлением, но не требует очистки поверхностей после обработки, позволяет одновременно травить подложки и удалять фоторезистивные маски, а также может использоваться для обработки любых материалов (нитрида кремния, алюминия, хрома, золота, платины, титана, молибдена, вольфрама и др.). Плазмохимическое травление проводится в среде реактивных газов. Для каждого материала подбирается своя среда травления (реактивные газы на основе соединений Cl или F). Процессы, протекающие на поверхности тонкой пленки при бомбардировке их тяжелыми заряженными частицами, сложны и многообразны. Основным механизмом энергообмена при взаимодействии ускоренных ионов с кристаллической решеткой является ядерное торможение, приводящее к созданию избыточной концентрации вакансионных и более сложных дефектов и, как следствие этого, к кардинальной реконструкции поверхности вплоть до полной ее аморфизации. Наряду с этим ионная бомбардировка способна вызывать преимущественное распыление отдельных компонентов схемы, что приводит к изменению стехиометрии состава поверхности пленки.

Способ ионного травления позволяет получить высокое аспектное соотношение защитной маски к обрабатываемому слою. Ионное травление позволяет сформировать структуры без подтравов под защитную маску фоторезиста. Недостатком метода является низкая скорость травления, что обуславливает необходимость длительной обработки. Такой метод хорошо подходит для травления слоев толщиной до 0,3 мкм (в зависимости от материала травления). Ионное травление проводится на установке «Радикал» или Watt-500. Травление осуществляется в среде инертного газа – аргона. При этом схема не загрязняется остатками процесса травления, так как образуемые в процессе травления радикалы имеют низкий порог летучести в вакууме и легко удаляются из зоны реакции откачной системой установки [5].

Жидкостный способ травления обладает высокой скоростью травления. Большинство физико-химических процессов, протекающих на поверхности, – это сложные превращения, в которых решающую роль играют активные короткоживущие промежуточные частицы (свободные радикалы, ионы, комплексные соединения). Такие активные частицы возникают в результате взаимодействия молекул твердого тела и травителя. При растворении поликристаллических твердых тел с их поверхности отделяются частицы и агрегаты частиц, распадающиеся до молекулярных и атомных размеров в глубине раствора. При этом ход процесса травления определяется случайным характером агрегатирования частиц вещества. От характера травителя и структуры тонкой пленки зависит механизм травления. Достоинствами метода являются высокая скорость травления, возможность выбирать состав травителя, что обеспечивает его селективность к участкам схемы или конструкции, не предназначенным для травления. Недостатком способа является изотропная модель травления материала, так как происходит подтрав под защитную маску фоторезиста, что затрудняет выдерживание допусков на геометрические размеры топологии [5, 6].

В качестве метода формирования топологии резистивного слоя выбран способ ионного травления, что позволяет избавиться от подтравов топологического слоя резистора, которые возникают в большей мере при жидкостном способе, и от изменения стехиометрического состава при плазмохимическом способе травления.

Определение химического состава в процессе формирования приборного слоя

Процесс ионного травления тонкой пленки SmS с целью формирования на поверхности кристалла измерительной схемы тензометрического датчика давления проводился в среде аргона на установке ионного травления Watt-500. Травление проводилась в три этапа с промежуточным контролем недотравленных участков SmS. В процессе травления определялся химический состав методом анализа послойных карт электронных изображений приборного слоя на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Jeol.

После травления с использованием линий рентгеновского спектра были получены послойные карты отдельных элементов, представленные на рис. 1, а, а также проведено исследование спектра излучения материалов на поверхности исследуемого образца, результаты которого приведены на рис. 1, б.

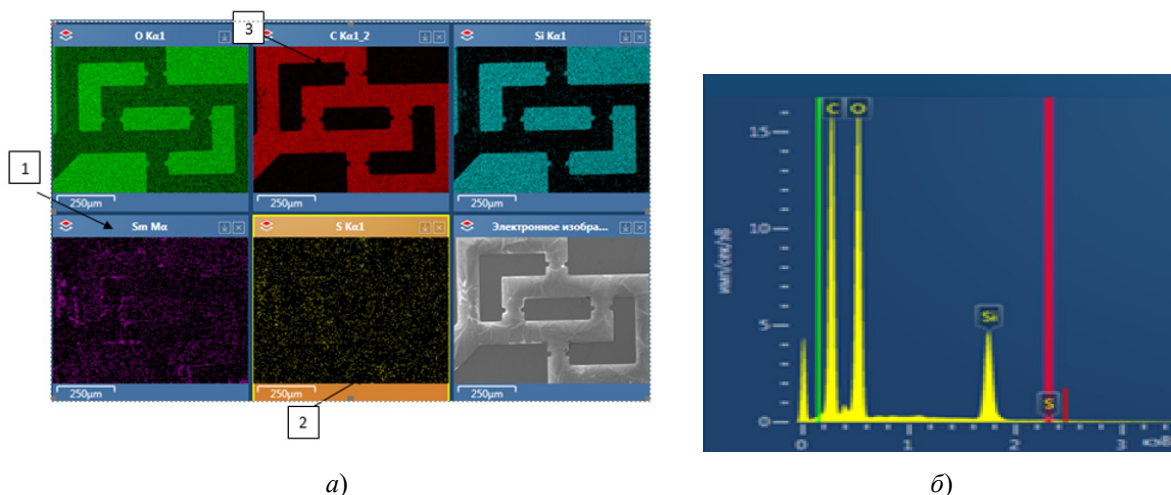


Рис. 1. Результаты определения состава приборного слоя после первого травления:
 а – послойные карты электронных изображений отдельных элементов;
 б – интенсивность спектров излучения материалов на поверхности исследуемого образца;
 1 – слой самария (Sm); 2 – слой серы (S); 3 – слой фоторезиста (C)

При анализе полученных данных выявлено, что на незащищенном поле подложки присутствует слой фоторезиста. В связи с этим проводилось повторное снятие фоторезиста в среде диметилформамида при температуре от 21 до 23 °C в течение 10 мин. Из-за продолжительной обработки фоторезиста пучком ионов в установке ионного травления Watt-500 (более 1 ч) после обработки в растворителе остались нерастворенные участки защитной маски. Для дотравливания фоторезиста проведена дополнительная обработка фоторезиста в кислородной плазме на установке плазмохимического травления «Рисо». Процесс реактивного плазменного травления осуществляется в условиях, когда на обрабатываемых образцах в условиях ВЧ-разряда создается отрицательный относительно плазмы электрический потенциал, отбирающий и ускоряющий ионы из плазмы по направлению к поверхности обрабатываемой подложки.

Результаты повторного травления представлены на рис. 2.

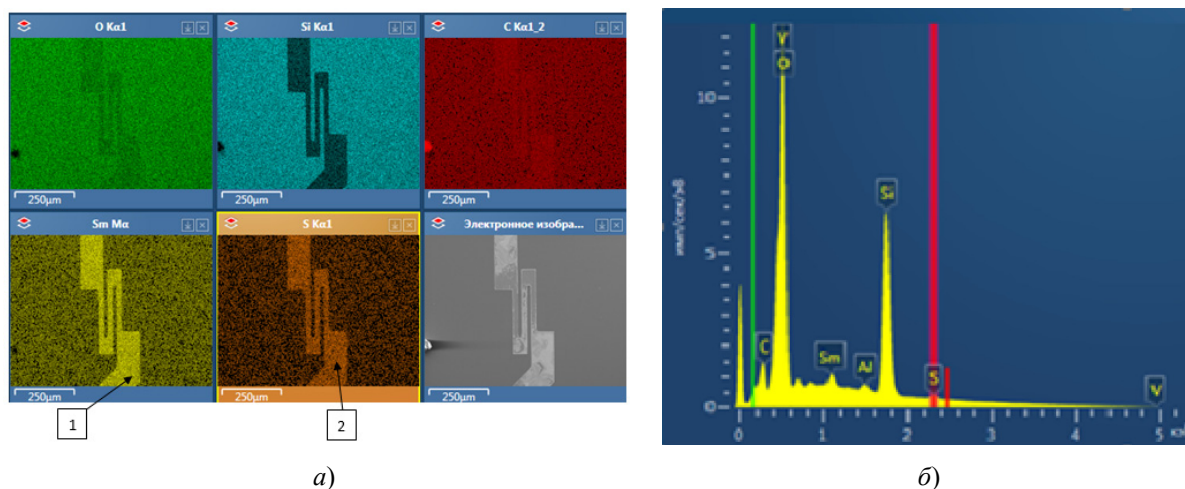


Рис. 2. Результаты определения состава приборного слоя после повторного травления:
 а – послойные карты электронных изображений отдельных элементов;
 б – интенсивность спектров излучения материалов на поверхности исследуемого образца; 1 – слой самария (Sm); 2 – слой серы (S)

В соответствии с рис. 2 при анализе полученных результатов прослеживаются пики спектра излучения самария (Sm) и серы (S), что свидетельствует о наличии сформированного слоя резистивного материала из SmS.

В связи с низкой химической устойчивостью халькогенидов к воздействию влаги, содержащейся в атмосфере, для обеспечения защиты приборного слоя и сохранения его химического состава в процессе изготовления и эксплуатации на установке Depolab сформирован слой нитрида кремния. После формирования данного слоя были проведены исследования химического состава на кремниевой подложке, результаты которого приведены на рис. 3.

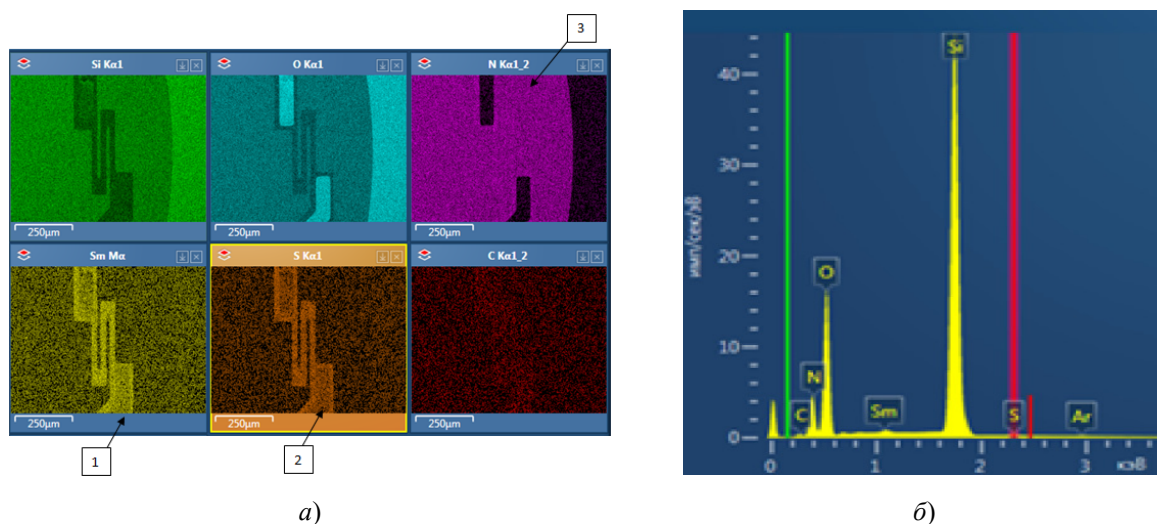


Рис. 3. Результаты определения состава приборного слоя после формирования защитного слоя из нитрида кремния: *а* – послойные карты электронных изображений отдельных элементов; *б* – интенсивность спектров излучения материалов на поверхности исследуемого образца; 1 – слой самария (Sm); 2 – слой серы (S); 3 – слой нитрида кремния, содержащий азот N)

В соответствии с полученными результатами прослеживаются пики спектра излучения самария (Sm) и серы (S), что свидетельствует о наличии сформированного слоя резистивного материала.

Для возможности измерения величины тензосопротивлений, подачи напряжения питания и снятия выходных характеристик в местах формирования контактных площадок нитрид травлен методом плазмохимического травления на установке Etchlab, а затем нанесен слой из алюминия, после травления которого сформированы металлизированные дорожки и контактные площадки. Для определения толщины сформированных слоев были проведены исследования сформированной структуры на лазерном профилометре Mitaka (рис. 4).

Исходя из полученных результатов определена толщина слоя резисторов с учетом защитного слоя равная $0,9 \pm 0,1$ мкм, а также толщина контактного слоя алюминия составляла $2 \pm 0,2$ мкм.

Определение состава пленок проводилось методом рентгенофазового анализа (один из методов рентгеноструктурного анализа). Метод основан на облучении образца направленным рентгеновским излучением и детектировании интенсивности отраженных частиц. Результат измерения показал наличие агломератов соединений Sm_xS_y . Рентгеновские лучи исследуют структуру и само соединение, в случае полиморфных тел дают возможность различить структурные модификации, свойственные определенному соединению. Гистограмма распределения интенсивности излучения для соединений Sm_xS_y представлена на рис. 5.

По оси *Y* представлены пики интенсивности для соединений вида Sm_xS_y , а по оси *X* представлены распределения пиков соединений в зависимости от угла кристаллической решетки, соответствующего определенному стехиометрическому составу соединения.

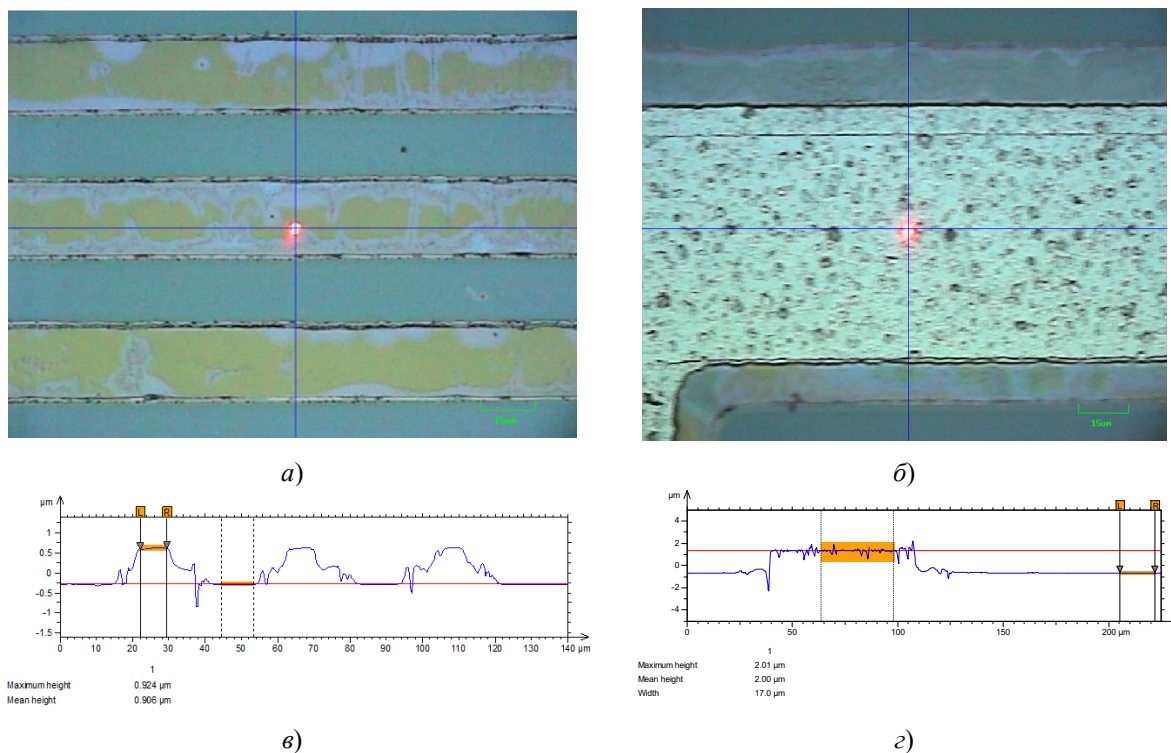


Рис. 4. Результаты определения толщины сформированных слоев:
 а – внешний вид тензорезистора формы меандр;
 б – внешний вид контактного слоя алюминия;
 в – результат замера профиля тензорезистора формы меандр;
 з – результат замера профиля контактного слоя алюминия

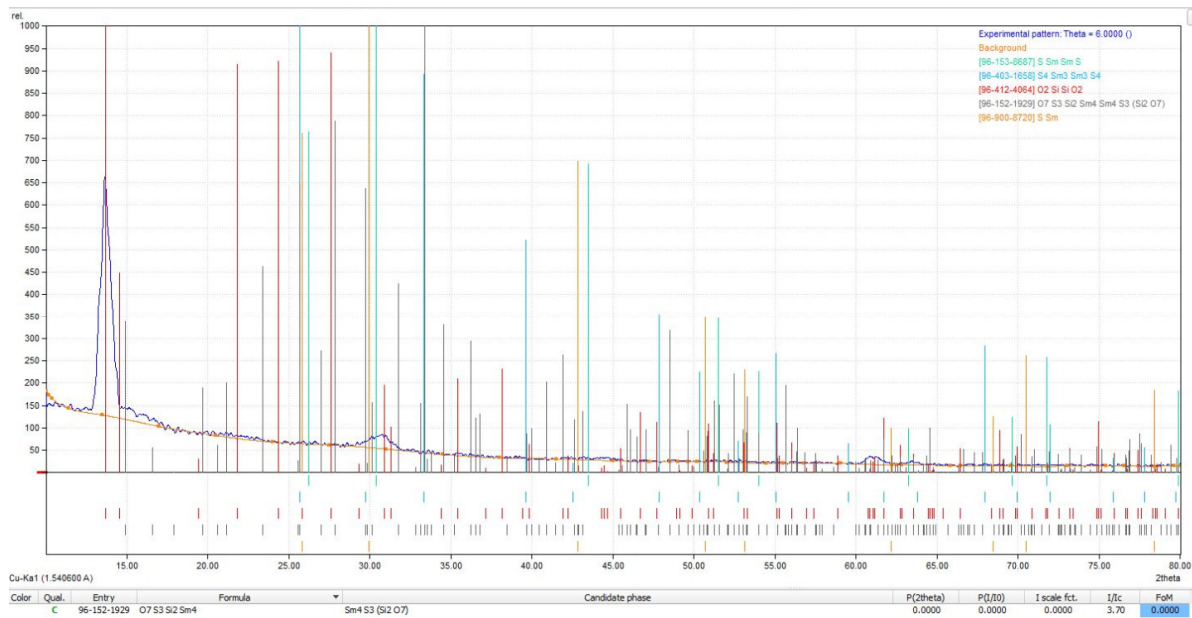


Рис. 5. Гистограмма распределения интенсивности излучения для соединений Sm_xS_y

Разновидность химических соединений, обнаруженных в спектре излучения, показана на рис. 6.

Соединение SmS присутствует в результирующем спектре, что подтверждает теоретические исследования в части выбора технологии напыления сульфида самария.

Color	Entry	Formula	Matched phase	Quant. (%) ▲
	96-153-8687	S Sm	Sm S	n.a.
	96-403-1658	S4 Sm3	Sm3 S4	n.a.
	96-412-4064	O2 Si	Si O2	n.a.
	96-152-1929	O7 S3 Si2 Sm4	Sm4 S3 (Si2 O7)	n.a.
	96-900-8720	S Sm		n.a.

Рис. 6. Обнаруженные виды химических соединений

Заключение

В результате исследований отработана технология формирования приборного слоя на поверхности чувствительного элемента комбинированным методом, а также исследовано влияние на состав нанесенного слоя SmS нитрида кремния, формирования топологической схемы SmS методом ионного травления и формирования металлизации. В соответствии с полученными результатами можно сделать вывод о правильности примененной технологии формирования приборного слоя, а также об оптимальной толщине резистивного слоя из моносulfида самария $0,9 (\pm 0,1)$ мкм и слоя металлизации $2 (\pm 0,2)$ мкм.

Библиографический список

1. Володин, Н. М. Тензометрия на основе редкоземельных полупроводников в космических аппаратах / Н. М. Володин, Ю. Н. Мишин, В. В. Каминский // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. – 2011. – № 5 (11). – С. 51–55.
2. Каминский, В. В. Барорезистивный эффект и полупроводниковые тонкопленочные барорезисторы на основе сульфида самария для аэрокосмических аппаратов / В. В. Каминский, Н. Н. Степанов, Н. М. Володин, Ю. Н. Мишин // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. – 2013. – № 1 (17). – С. 11–16.
3. Конструирование и технология микросхем. Курсовое проектирование / Л. А. Коледов, В. А. Волков, Н. И. Докучаев, Э. М. Ильина, Н. И. Патрик ; под ред. Л. А. Коледова. – Москва : Высш. шк., 1984. – 231 с.
4. Крайнова, К. Ю. Технология изготовления полупроводникового чувствительного элемента датчика давления на основе поликристаллического алмаза / К. Ю. Крайнова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 90–96.
5. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники / И. П. Степаненко. – Москва : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. – 488 с.
6. Пауткин, В. Е. Химическое формообразование элементов МЭМС / В. Е. Пауткин // Датчики и системы. – 2018. – № 8-9. – С. 56–61.

References

1. Volodin N. M., Mishin Yu. N., Kaminskiy V. V. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina* [Bulletin of the NGO. S. A. Lavochkina]. 2011, no. 5 (11), pp. 51–55. [In Russian]
2. Kaminskiy V. V., Stepanov N. N., Volodin N. M., Mishin Yu. N. *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina* [Bulletin of the NGO. S. A. Lavochkina]. 2013, no. 1 (17), pp. 11–16. [In Russian]
3. Koledov L. A., Volkov V. A., Dokuchaev N. I., Il'ina E. M., Patrik N. I. *Konstruirovaniye i tekhnologiya mikroshkem. Kursovoye proektirovaniye* [The design and technology of microcircuits. Course design]. Moscow: Vyssh. shk., 1984, 231 p. [In Russian]
4. Kraynova K. Yu. *Izmereniye. Monitoring. Upravleniye. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 90–96. [In Russian]
5. Stepanenko I. P. *Osnovy mikroelektroniki* [Basics of microelectronics]. Moscow: Laboratoriya Bazovykh Znaniy, 2001, 488 p. [In Russian]
6. Pautkin V. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 8-9, pp. 56–61. [In Russian]

Макаров Иван Васильевич

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Mackerof@mail.ru

Makarov Ivan Vasil'evich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Перельгина Александра Владимировна

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Aperylygina91@gmail.com

Perelygina Aleksandra Vladimirovna

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Чапанов Никита Сергеевич

инженер-технолог,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Jdarwin55@gmail.com

Chapanov Nikita Sergeevich

engineer-technologist,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Шокоров Вадим Александрович

инженер-конструктор,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)
E-mail: Shokorov58@gmail.com

Shokorov Vadim Aleksandrovich

design engineer,
Scientific-research Institute
of physical measurements
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Макаров, И. В. Исследование влияния химической обработки на свойства моносulfida самария в процессе изготовления кристаллов датчиков давления / И. В. Макаров, А. В. Перельгина, Н. С. Чапанов, В. А. Шокоров // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 4 (30). – С. 77–84. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-4-9.